

# **Tagungsband**

Klaus Brökel, Jörg Feldhusen,  
Karl-Heinrich Grote, Frank Rieg, Ralph Stelzer

## **12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2014**

Methoden in der Produktentwicklung:  
Kopplung von Strategien und Werkzeugen im Produktentwicklungsprozess

am 16. und 17. Oktober 2014 in Bayreuth

Methoden in der Produktentwicklung:

Kopplung von Strategien und Werkzeugen im Produktentwicklungsprozess

12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (KT 2014)

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg (Universität Bayreuth)

Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Brökel (Universität Rostock)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen (RWTH Aachen)

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg)

Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer (Technische Universität Dresden)

ISBN 978-3-00-046544-4

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Layout: Christian Dinkel, Pascal Diwisch, Stefan Hautsch (Universität Bayreuth)

Umschlaggestaltung: Felix Viebahn (Universität Bayreuth)



---

## Vorwort

Die steigende Komplexität von technischen Systemen, Variantenvielfalt, hohe Qualitätsanforderungen sowie zeit- und kostenintensive Versuche sind nur einige Gründe, die eine effiziente und innovationsfördernde Kopplung von Strategien und Werkzeugen im Produktentwicklungsprozess zwingend bedingen. Dieses Thema, das die Grundlage des 12. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik bildet, ist die Basis des wirtschaftlichen Erfolges von Unternehmen in einer global zunehmend vernetzten Welt, in der die Fertigungstiefe am Wirtschaftsstandort Deutschland immer weiter abnimmt. Gerade deshalb müssen Innovationspotentiale bestmöglich ausgeschöpft werden.

Im Zeichen dieser Wettbewerbsfaktoren soll das Kolloquium ein Forum bieten, welches Hochschulwissenschaftlern aus verschiedensten Ingenieurgebieten einen fruchtbaren Austausch erlaubt. Denn nur durch neu erworbene Erkenntnisse und die damit einhergehende Rationalisierung sowie qualitative Optimierung des Produktentwicklungsprozesses können Unternehmen auch zukünftig ihre Hauptaufgabe – die Bedürfnisse von Konsumenten bzw. Kunden befriedigen – nachhaltig erfüllen.

Daher möchte ich an dieser Stelle besonders jenen für Ihre Arbeit und Mühe danken, welche die Diskussionsgrundlage unserer Tagung liefern: den Vortragenden. Des Weiteren gilt mein ausdrücklicher Dank allen Gästen, welche durch ihr Interesse die Veranstaltung bereichern.

Ich möchte allen Teilnehmern einen angenehmen Aufenthalt in der Festspiel- und Universitätsstadt Bayreuth und eine erfolgreiche Veranstaltung wünschen. Mögen daraus viele neue Ideen entstehen, welche im Rahmen des Kolloquiums 2015 zur weiteren Diskussion gestellt werden können.

Bayreuth, Oktober 2014

Professor Dr.-Ing. Frank Rieg



---

## Inhaltsverzeichnis

### Plenarsitzung

#### **Variants evaluation of Product-Service Systems**

*K. Exner, C. Schnürmacher, J. Thiele, F. Schulz, R. Stark*

Technische Universität Berlin / Fraunhofer IPK..... 1

#### **Modularisierung - Entwicklungsmethodik für die Praxis**

*K. Schmitz, J. van der Beek, J. Feldhusen*

RWTH Aachen..... 11

### Session: Methoden im Produktentwicklungsprozess

#### **Einsatz virtueller und experimenteller Methoden im Produktentwicklungsprozess von Effektoren für technische Textilien**

*M. Rolbiecki, J.-H. Ohlendorf, K.-D. Thoben*

Universität Bremen ..... 23

#### **Process Analysis and Optimization by Targeted Application of Knowledge Management**

##### **A Case Study in the Early Stages of Product Development**

*A. Albers, R. Lüdcke, N. Bursac, J. Will*

Karlsruher Institut für Technologie / Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG ..... 33

#### **Einführung eines ERP-Systems - ein Praxisbericht**

*M. Altgott, W. Sticht*

ebu Umformtechnik GmbH..... 43

#### **Eine Methode für eine Prüf- und Validierungsumgebung zur Komponenten- untersuchung handgehaltener Geräte in der Produktentwicklung**

*S. Matthiesen, T. Gwosch, S. Mangold*

Karlsruher Institut für Technologie ..... 51

#### **Entwicklung kontextsensitiver Standards in modularen Produktplattformen**

*J. van der Beek, K. Schmitz, J. Feldhusen*

RWTH Aachen..... 63

## **Interdisziplinäre Produktplanung und Produktdefinition - ein Turmbau zu Babel?**

*H. Schnegas*

Hochschule Wismar ..... 73

## **Ansatz zur situations- und bedarfsgerechten Methodenauswahl in der Produktentstehung basierend auf dem Systemtripel Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem**

*A. Albers, B. Walter, B. Gladysz, N. Reiß, M. Dörr, M. Hinkelmann*

Karlsruher Institut für Technologie ..... 83

## **Effective Role of Vendor's Selection in Product Development Industries**

*I. Raza, M. Shafique, J. Feldhusen*

RWTH Aachen ..... 95

## **Ingenieurarbeitsplatz der Zukunft: Anforderungsaufnahme, Systematisierung und Versuchsaufbau für ein Labor**

*F. Schulz, K. Exner, H. Hayka, R. Stark*

Fraunhofer IPK / TU Berlin ..... 107

## **Kosteneinsparpotenzial durch die Verwendung von hohlen, generativ gefertigten Ausbrennmodellen für das Vakuum-Differenzdruck-Gießen**

*K. Kuhlmann, F. Klink, K.-H. Grote*

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg ..... 121

## **Methodische Integration von Mitarbeiterwissen in die Produktentwicklung**

*R. Bot-Schulz, I. Schulz*

Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt / SKF GmbH ..... 131

## **Eine Methode zur Anpassung von Prüfumgebungen für Wirkungsgraduntersuchungen an Hochdrehzahlgetrieben**

*A. Albers, F. Brezger, U. Reichert*

Karlsruher Institut für Technologie ..... 141

## **Varianten- und Komplexitätsmanagement für individualisierte Produkte**

*Y. Hooshmand, P. Köhler, A. Korff-Krumm*

Universität Duisburg-Essen / Siemens AG ..... 151

---

## Session: Virtuelle Produktentwicklung

### **Analyse und Vergleich neuer 3D CAD Datenformate als Basis für Soll-Ist-Vergleiche auf mobilen Endgeräten**

*E. Kloß, K. Brökel*

Universität Rostock ..... 161

### **Methode zur Beherrschung von Unsicherheit in expliziten 3D-CAD Geometrien**

*M. Zocholl, T. Trinkel, R. Anderl*

Technische Universität Darmstadt ..... 173

### **Potenzial der bildgebenden Digitalisierverfahren im Maschinenbau**

*D. Hofmann, P. Sembdner, S. Holtzhausen, C. Schöne, R. Stelzer*

Technische Universität Dresden ..... 183

### **Integration einer Prüfmethode auf fertigungsgerechte Konstruktion für generative Fertigung in die virtuelle Produktentwicklung**

*A. Arndt, S. Haag, R. Anderl*

Technische Universität Darmstadt ..... 193

### **Nichtlineares Spaltprofilieren von Blechprofilen im rechnerunterstützten Produktentwicklungsprozess**

*K. Albrecht, T. Weber Martins, R. Anderl*

Technische Universität Darmstadt ..... 203

### **3D-Tumor-Referenzmodelle für die Evaluierung von Kontierungsalgorithmen für das PET/CT Bildgebungsverfahren**

*I. Jonuschies, K. Brökel, J. Kurth, B. J. Krause*

Universität Rostock / Universitätsklinikum Rostock ..... 213

### **CAD-neutrale 3D-Mastermodelle als zentrale Informationsträger in verteilten Entwicklungsprojekten**

*A. Christ, R. Anderl*

Technische Universität Darmstadt ..... 225

|   |     |
|---|-----|
| <b>Automatisierte Parameterstudien in der Finite-Elemente-Analyse zur Verbesserung des Leichtbaupotenzials von Sandwichstrukturen</b><br><i>F. Rudolph, F. Viebahn, F. Rieg</i><br>Universität Bayreuth.....  | 237 |
| <b>Integration der geometrischen Produktspezifikation (GPS) in den methodischen Konstruktionsprozess am Beispiel eines Prüfstandes</b><br><i>M. Ebermann, E. Leidich</i><br>Technische Universität Chemnitz.....                                    | 247 |
| <b>Effizienzsteigerung des Produktentwicklungsprozesses durch fertigungsgerechte CAD-Methoden</b><br><i>M. Humpa, P. Köhler</i><br>Universität Duisburg-Essen.....  | 263 |
| <b>Entscheidungsunterstützung bei der kunden- und anbietergerechten Konzeptentwicklung im Rahmen der Angebotsdefinition in der Anpassungs- und Variantenkonstruktion</b><br><i>M. Walch, A. Albers</i><br>Karlsruher Institut für Technologie ..... | 275 |
| <b>Theorie der Konstruktionsähnlichkeit bei der Bildung von geordneten Konstruktionsfamilien</b><br><i>P. Gendarz</i><br>Schlesische Technische Universität .....   | 287 |
| <b>Automatisierte Konfiguration auftragsspezifischer Stahlkonstruktionen</b><br><i>T. Manoharan, A. Martha, P. Köhler</i><br>Universität Duisburg-Essen.....  | 303 |
| <b>Systematische Identifikation einer anforderungsoptimalen Sandwichkonfiguration mit Hilfe einer Multikriterienoptimierung (MKO)</b><br><i>L. G. Ngahane Nana, T. Fieder, S. Dallmeier, B. Günther, J. Feldhusen</i><br>RWTH Aachen .....          | 313 |
| <b>Generalisierte Einbindung von Interaktionstechniken in Engineering-Anwendungen</b><br><i>R. Stelzer, S. Arndt, E. Steindecker, W. Steger</i><br>Technische Universität Dresden .....   | 323 |

---

## Session: Simulation und Optimierung

### **Finite Elemente Analyse auf Android**

*D. Goller, C. Glenk, F. Rieg*

Universität Bayreuth..... 333

### **Integrierte Betrachtung von temporären Mischreibungsgebieten bei der Simulation hydrodynamisch wirkender Radialgleitlager - Ansätze im System SIRIUS**

*S. Zorn, K. Brökel*

Universität Rostock..... 341

### **FEM-Optimierung der Spannungskonzentrationen mit Hilfe von Entlastungskernen an Sicherungsringnuten bei Zahnwellen**

*A. Daryusi, C. Benz, S. Jung*

Hochschule Offenburg ..... 351

### **Systematisches Testen von numerischen Berechnungswerkzeugen**

*J. Langenbach, N. Nagler, N. Müller, A. Lohrengel*

Technische Universität Clausthal..... 361

### **Entwicklung und Anwendung von neuartigen plastischen Materialmodellen für die Finite-Elemente-Analyse**

*C. Wehmann, F. Rieg*

Universität Bayreuth..... 371

### **FEM-Untersuchung zur Durchdringungskerbwirkung beim Zusammentreffen von Umlaufnut und Querbohrung in Wellen**

*A. Daryusi, A. Roller, S. Jung*

Hochschule Offenburg ..... 385

### **Entwicklung und Berechnung gewichtsoptimierter Platten aus faserverstärkten Kunststoffen**

*F. Baudach, I. Barz, F. Engelmann, T. Guthmann*

Ernst-Abbe-Hochschule Jena ..... 397

**Gewichtsoptimierung in den frühen Phasen der Entwicklung  
Anforderungen, Funktionen, Wirkprinzipien**

*T. Luedeke, R. Bonertz, M. Vielhaber*

Universität des Saarlandes ..... 407

**Berechnungsmodelle im Sinne von Prognose und Therapieplanung  
bei schweren Schädel-Hirn-Traumata**

*H.-P. Prüfer*

Ruhr-Universität Bochum ..... 417

**Workflow zur Entwicklung effizienter Leichtbaustrukturen am Beispiel  
einer druckbelasteten Platte**

*T. Guthmann, F. Baudach, I. Barz, F. Engelmann*

Ernst-Abbe-Hochschule Jena ..... 427

**Optimierung der Zahnfußgeometrie von Stirnrädern durch den Einsatz  
FE-basierter Optimierungsmodelle im Verbund mit der Zahnkontaktanalyse**

*C. Brecher, M. Brumm, J. Pollaschek*

RWTH Aachen ..... 437

**Vergleich der Auswirkungen auf den Designvorschlag durch Festigkeits-  
und Steifigkeitsoptimierung**

*K. Deese, S. Hautsch, M. Frisch, F. Rieg*

Universität Bayreuth..... 449

**Ein Ansatz zur adaptiven Simulationsdatenerhebung**

*T. Breitsprecher, C. Dingfelder, S. Wartzack*

Universität Erlangen-Nürnberg..... 461

**Ganzheitliche Integration von „Design for X“-Kriterien in den mechatronischen  
Produktentwicklungsprozess am Beispiel der Gewichtsoptimierung**

*T. Luedeke, M. Vielhaber*

Universität des Saarlandes ..... 471

**Approach on Remote Maintenance Supervision of Solar Home Systems**

*K. Wrasse, L. Wolter, H. Hayka, R. Stark*

Fraunhofer IPK / TU Berlin ..... 481



## Variants evaluation of Product-Service Systems

Konrad Exner<sup>\*1</sup>, Christian Schnürmacher<sup>\*1</sup>, Justus Thiele<sup>\*1</sup>, Felix Schulz<sup>\*2</sup>,  
Rainer Stark<sup>\*1,2</sup>

<sup>\*1</sup>Fachgebiet für Industrielle Informationstechnik, Technische Universität Berlin

Pascalstraße 8-9, 10587 Berlin

E-Mail: konrad.exner@tu-berlin.de, christian.schnuermacher@tu-berlin.de, rainer.stark@tu-berlin.de;

Internet: <http://www.iit.tu-berlin.de/>

<sup>\*2</sup>Geschäftsfeld Virtuelle Produktentstehung, Fraunhofer IPK

Pascalstraße 8-9, 10587 Berlin

E-Mail: felix.schulz@fraunhofer.ipk.de, rainer.stark@fraunhofer.ipk.de; Internet:

<http://www.ipk.fraunhofer.de>

**Abstract:** *Due to the increasing demand of industry for concepts that span the entire lifecycle of products combined with services, Product-Service Systems (PSS) have become the subject of extensive research in recent years. The integration of tangible and intangible components in a combined solution, which is managed and maintained by the provider offer the opportunity for an increased revenue generation while improving customer satisfaction. By combining products, services, business models, infrastructure, software etc. the complexity of the systems to be developed increases. To ensure the successful development and to achieve a reduction of development time and costs different concepts during early development phases need to be evaluated by key criteria. This paper provides a literature research for variant evaluation regarding products and services and offers a method to evaluate PSS concepts.*

**Keywords:** *Product-Service Systems; PSS; variant evaluation*

## 1 Introduction

In global markets companies of developed countries have to deal with competitors of emerging markets which constantly catch up regarding technology and quality. Furthermore, the customer demands innovative and individual solutions. PSS provide an opportunity for companies to differentiate themselves from competitors. In combining system elements like products, services and infrastructure customized solutions can be offered. Therefore, some companies change their mindsets and become solution providers. [1]

Regarding the development process Product-Service Systems are under heavy research. New development methodologies to enable an integrated development of determined PSS elements have been proposed and evaluated in research. The implementa-

tion in industry is gradually increasing, but encounters barriers regarding the new mindset especially in Germany [2].

Due to interdependencies between PSS elements a simple transfer of validation methods is not feasible [3]. For each validation objective existing product and service development methods need to be analysed regarding a transfer in PSS development processes. For the validation of PSS the research question is as follows: How can PSS concepts in early development phases be evaluated for different key criteria?

The main objective is to compare different versions of PSS concepts before starting detailed concept and PSS development.

## 2 Research approach

The research approach consists of three steps (see Figure 1):

|  |   |
|--|---|
| 1. Descriptive Study I<br>(chapter 3)  | Literature research for variant analyzes in classical product development and service development methodologies |
| 2. Prescriptive Study<br>(chapter 4)   | Development and feasibility testing of a new method to evaluate variants of PSS                                 |
| 3. Descriptive Study II<br>(chapter 5) | The most suitable method is tested and evaluated in an expert workshop  |

Figure 1: Research approach

## 3 Relation to existing theories and work

The current range of variant evaluation methods can be classified according to the subject of their inspection: classic products and services. Due to the vast array of different methods, only those which show a focus on the core components of a PSS, customer satisfaction and economic feasibility are considered. For variant evaluation in classic product development these criteria are met by the **Utility Analysis (UA)**, the **VDI 2225** and the **Quality Function Deployment (QFD)** (see chapter 3.1). For variant evaluation in service development the **Kano-model**, the **Design Structure Matrix (DSM)** and the **Consistency Matrix (CM)** comply with these requirements (see chapter 3.2).

### 3.1 Variant evaluation in classic product development

During the application of the **UA** the operator selects target criteria which are deemed important for the final product, assesses the adherence of different concepts to said criteria and thus calculates a ranking of the different concepts against each other [4]. The main advantage is the flexibility and versatility, the main disadvantage is the simplification of complex data into single numbers. The evaluation method described in **VDI 2225** focus on the technical and economical qualities of concepts. These are calculated separately on a scale from 0 to 1, where a 0.8 equates to a very good result. The resulting numbers, which signal compliance with previously laid out goals, are then mapped in a strength diagram, in which previously agreed upon indifference lines indicate the optimal solution out of the presented ones. The model also allows the inclusion of must-haves in order to better define the resulting product [5]. The main advantages are the flexible strength diagram as well as the individual assessment of different components. The simplification in the economical view by reducing it to manufacturing costs can be seen as the main shortcoming of this method. The **QFD** concerns itself with the development of products. Within the OFD the House of Quality serves the role of an iterative evaluator of the development progress. This tool puts the customer needs in direct correlation with the components of the products that are being developed, and aims to quantify the strengths and weaknesses of them [6]. This very thorough approach necessitates the use of significant resources, as the numbers of examined parameters commonly exceed 60. The iterative, repeated nature further complicates the process [7]. The main advantages are the structured approach in addition to the objectivity. The main disadvantage is the amount of resources needed in order to correctly conduct this method.

### 3.2 Variant evaluation in service development

The **Kano-model** focus on the connection of customer needs with product characteristics, in which customers classify features in 3 different categories through the means of a survey: Must-be, one-dimensional and attractive. This classification allows developers to curtail the characteristics of the products to the respective market [8]. The advantage lies in the ease of use as well as the validation of the customer needs. The main disadvantage is the lack of a distinctive evaluation operation. The main emphasis of the **DSM** is the analysis of interdependencies between components of complex systems. At first, all steps

and/or actors are listed and relations between them are graphed. Following this, a logical order of steps is determined through the application of a matrix, which groups the steps in sensorial clusters, such as being coupled or parallel [9]. The main advantage is the disentanglement of very complex processes through an easy to apply algorithm. The main disadvantage is the lack of a conclusive evaluation method as an addendum to the clarification. The **CM** occupies a unique space regarding evaluating methods, as it compares concepts rather than variants. It selects important, quantifiable factors, assigns them different possible values and calculates the consistency between them in order to create the most likely concepts for the future. It is against these concepts that the products are tested [10]. The main advantage lies in covering a very broad spectrum of concepts whilst keeping the scope small. The main disadvantage is the subjective creation of said concepts.

## **4 PSS evaluation method**

The analysis of the two preceding chapters shows that none of the existing methods in their original form are capable of accurately evaluating PSS variants in the early phases of product development whilst offering a plethora of starting points for the development of a new, better suited alternative. This alternative combines new PSS specific approaches with a selection of the before described methods to overcome their weaknesses whilst using their strengths.

### **4.1 Comprehensive evaluation method**

This complex method aims to account for the listed disadvantages of the aforementioned methods through combining and adjusting them, leading to a 5-step process as seen in Figure 2:

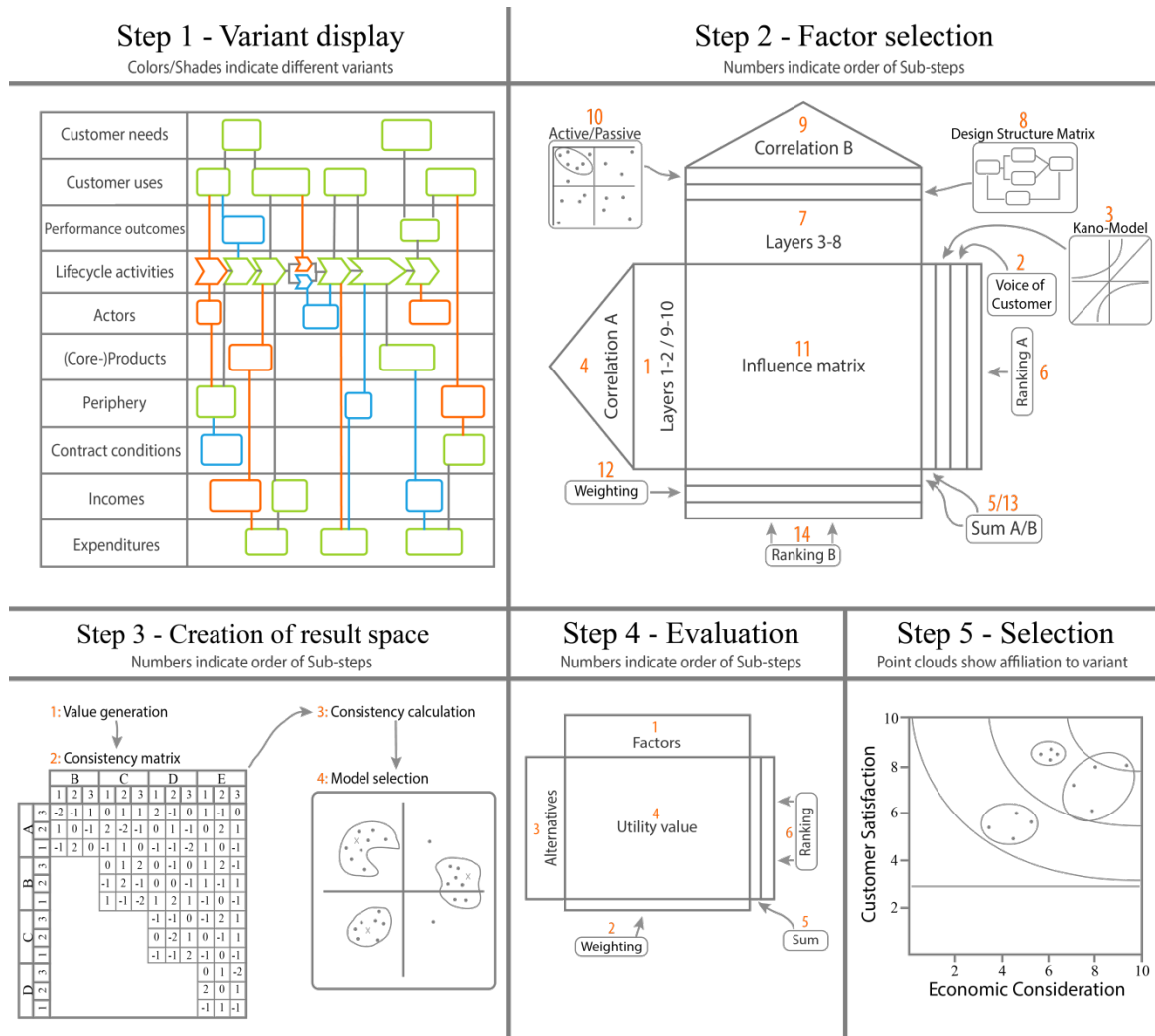


Figure 2: Framework of the comprehensive evaluation method

The **variant display** is based on the HLB-Layer-Method [11], which serves as a starting point for the entire method and which is carried out once for all the variants. Its main focus is the visualization of the core differences between the variants and increases the simplicity of conducting the method through establishing a basis of understanding. If applicable, cases in which the proposed variants need to be seen as separate products can be identified at this stage. For example, a company supplying power plants for energy companies identifies contract conditions and lifecycle activities as the main differences between three variants: Firstly, supplying a plant for use by the customer. Secondly, deliver a certain power output. Thirdly, ensure an uptime quota. The **factor selection** is based on the concept of the QFD and is expanded through other procedures in order to achieve objectivity whilst also reducing the degree of complexity. This step is conducted once for eve-

ry variant and evaluation dimension and takes up the most time due to the number of sub-components and steps associated with it. For example, the manufacturer determines the most important factors regarding customer satisfaction and economic viability of the PSS (e.g. uptime, bound capital) and in turn establishes the aspects of each variant which carry the highest impact on these factors. An exemplary difference is the importance of part warranty and service in the first variant, while the third focuses on expenditures through depreciation. The **creation of the result space** is based on the Consistency Matrix and aims to increase the significance of the end result through developing different scenarios of the single variants. Consequently, this step has to be carried out once per variant and allows for a more concrete idea of it. Additional advantages are the creation of new knowledge without the need for lengthy processes. For example, the second variant is mapped out further through creating three alternatives: Firstly, a decentralized wind farm with attached storage capacities. Secondly, a steam and gas fired power plant as a base supplier. Thirdly, a steam and gas fired power plant as a peak supplier. The **evaluation** is based on the Utility Analysis and is conducted once per evaluation dimension. The maintenance of objectivity amidst the transparency of the following decisions is the main focus of this step. For example, the different alternatives of Variant 3 score high in customer satisfaction and low in the economic consideration. The mean deviation is very high. The **selection** is based on the VDI 2225 and is conducted once for all variants. It contains the final decision based on the value of the evaluation dimensions. During this operation the volatility of a solution can be ascertained in dependence to the examined parameters in order to identify potential risks. For example, the third variant has a high mean deviation, indicating volatility. The second variant performs well in the first condition and shows low risk with low mean deviation. The company decides to further develop the second variant, using the knowledge gained in the process

The main problem associated with this method, which has been emphasized in a first testing, is the complexity of carrying it out and the needed time associated with it. For this reason a method for a quick and user-friendly evaluation of PSS concepts has been developed (see chapter 4.2).

## 4.2 Utility analysis for PSS

The method is based on the utility analysis and consists of four steps (see Figure 3).



Figure 3: Framework of the utility analysis for PSS

Regarding the classical approach in VDI 2225 [5] there are three main differences: Firstly, the new method is specialised for the comparison of PSS due to the consideration of service characteristics as well as the technical and economic aspects. Secondly, the matrix is extended with evaluation criteria, which determinate the evaluation dimensions. Thirdly, the evaluation scale consists of positive, negative and neutral choices.

The **first** step aims to describe the PSS concepts and the main differences between them. All features and the main differences of the PSS concepts are matched to the lifecycle activities and should be described in a clear and concise manner. In the **second** step, the evaluation criteria for the comparison of the PSS concepts are determined. The criteria define the evaluation dimensions and can be divided into two main groups: customer-specific and provider-specific, in accordance with the different points of view during the evaluation. The criteria can be freely chosen by the user(s); creative methods like brainstorming are recommended as suitable for the criteria derivation. The main purpose of the **third** step is the evaluation. The matrix as well as the evaluation scale has been defined (see Figure 4), but can be customized due to specific objectives. To reduce complexity for the user it is recommended to use a scale with less than eight options.

| Scenario | n           | Evaluation scale   |  |   |  |   |  | $\Sigma$ |  |
|----------|-------------|--|--|---|--|---|--|----------|--|
|          |             | 10 – The feature of the lifecycle module has a strong positive effect to the scenario. | 6 – The feature of the lifecycle module has positive effect to the scenario. | 3 – The feature of the lifecycle module has a slight positive effect to the scenario. | 0 – The feature of the lifecycle module has no effect to the scenario. | -3 – The feature of the lifecycle module has a slight negativ effect to the scenario. | -6 – The feature of the lifecycle module has negativ effect to the scenario. |          |  |
|          |             | evaluation criteria 1  | evaluation criteria 2  | ..  | ..   | ..  | evaluation criteria n  |          |  |
|          | Lifecycle 1 |  |  |   |  |   |  |          |  |
|          | Lifecycle n |  |  |   |  |   |  |          |  |
|          |             |  |  |   |  |   |  | $\Sigma$ |  |

Figure 4: Evaluation matrix

Based on this, the user(s) evaluate all PSS concepts. In order to reduce the subjectivity the method should be conducted with multiple users. In the **fourth** step the results of the users are collected and an average result is calculated. The PSS concept with the highest grade is the one that fulfils the chosen criteria in the best suitable manner.

## 5 Findings

As described in chapter 4 the utility analyses for PSS has been determined as the most suitable method. To evaluate the utility analysis for PSS the method was used to assess three PSS concepts within the research project “Rethinking Prototyping”. The PSS concepts have been evaluated in a two hour workshop with eleven PSS research experts. After a short introduction to the method, the workshop participants received a description of the three scenarios, a template of the utility analysis matrix (see chapter 4.2) and an evaluation form. Afterwards the experts had to fill out the matrix (e.g. in Figure 5) and complete the evaluation form.

|          |   | Evaluation scale   | effort | flexibility | safety | accessibility | comfort | time saving | $\Sigma$ |          |
|----------|---|--|--------|-------------|--------|---------------|---------|-------------|----------|----------|
|          |   | 10 – The feature of the lifecycle module has a strong positive effect to the scenario. |        |             |        |               |         |             |          |          |
|          |   | 6 – The feature of the lifecycle module has positive effect to the scenario.           |        |             |        |               |         |             |          |          |
|          |   | 3 – The feature of the lifecycle module has a slight positive effect to the scenario.  |        |             |        |               |         |             |          |          |
|          |   | 0 – The feature of the lifecycle module has no effect to the scenario.                 |        |             |        |               |         |             |          |          |
|          |   | -3 – The feature of the lifecycle module has a slight negativ effect to the scenario.  |        |             |        |               |         |             |          |          |
|          |   | -6 – The feature of the lifecycle module has negativ effect to the scenario.           |        |             |        |               |         |             |          |          |
|          |   | -10 – The feature of the lifecycle module has a strong negativ effect to the scenario. |        |             |        |               |         |             |          |          |
| Scenario | 1 | LC 1: Web/App reservation  | 10     | 6           | 3      | 10            | 6       | 10          | 6,429    |          |
|          |   | LC 2: Network of stations  | 3      | 6           | 6      | -3            | 3       | 3           | 2,571    |          |
|          |   | LC 3: “Social-Pedelec-Network” communication platform                                  | 3      | 0           | 3      | 0             | 6       | 3           | 2,143    |          |
|          |   |  |        |             |        |               |         |             |          | $\Sigma$ |

Figure 5: Excerpt of the evaluation form of one participant

Furthermore, the data has been analysed regarding averages and standard deviation etc. (see Figure 6). The statistical parameter indicates excellent results for 39 % of all ratings. However, 6 % of the ratings show a high statistical variance, due to different perspectives regarding the meaning of some criteria for specific lifecycle phases. Finally the experts and the workshop moderator discussed the improvement potentials and the PSS utility analysis results were analysed with regard to irregularities and identification of further weaknesses of the method. As a result all experts regarded the method as a useful tool to evaluate PSS concepts in the early phase of PSS development.



| <b>Evaluation scale</b><br>10 – The feature of the lifecycle module has a strong positive effect to the scenario.<br>6 – The feature of the lifecycle module has positive effect to the scenario.<br>3 – The feature of the lifecycle module has a slight positive effect to the scenario.<br>0 – The feature of the lifecycle module has no effect to the scenario.<br>-3 – The feature of the lifecycle module has a slight negativ effect to the scenario.<br>-6 – The feature of the lifecycle module has negativ effect to the scenario.<br>-10 – The feature of the lifecycle module has a strong negativ effect to the scenario. |   | effort | flexibility | communication possibility | safety | accessibility | comfort | time saving | $\Sigma$       |
|---|---|--------|-------------|---------------------------|--------|---------------|---------|-------------|----------------|
| Scenario 1:<br>single-seater Pedelec & Station  | LC 1: Web/App reservation                             | 7,44   | 6,44        | 1,11                      | 1,11   | 4,56          | 7,33    | 7,56        | 5,079          |
|   | MAX   | 10     | 10          | 10                        | 10     | 10            | 10      | 10          |                |
|   | MIN   | 3      | -3          | -6                        | -3     | -3            | 6       | 3           |                |
|   | Standard deviation:                                   | 2,45   | 4,11        | 5,09                      | 4,23   | 4,06          | 1,89    | 2,91        |                |
|   | LC 2: Network of stations                             | 2,00   | 3,44        | 1,78                      | 0,67   | 1,33          | 1,00    | 1,33        | 1,651          |
|   | MAX   | 6      | 10,00       | 10,00                     | 6,00   | 6,00          | 6,00    | 6,00        |                |
|   | MIN   | -3,00  | -6,00       | -3,00                     | -3,00  | -6,00         | -3,00   | -3,00       |                |
|   | Standard deviation:                                   | 3,16   | 4,72        | 3,46                      | 2,75   | 4,03          | 3,16    | 3,50        |                |
|   | LC 3: "Social-Pedelec-Network" communication platform | 1,67   | 3,44        | 9,56                      | 1,00   | 2,44          | 5,11    | 2,33        | 3,651          |
|   | MAX   | 6      | 10          | 10                        | 3      | 10            | 10      | 6           |                |
|   | MIN   | 0      | 0           | 6                         | 0      | -3            | 3       | 0           |                |
|   | Standard deviation:                                   | 2,49   | 3,20        | 1,26                      | 1,41   | 3,62          | 2,23    | 2,36        |                |
|   |   |        |             |                           |        |               |         |             | $\Sigma$ 3,460 |

Figure 6: Excerpt of the analysis of all participants

Nevertheless all experts identified improvement potentials: The three concepts should be explained by the workshop moderator in more detail and the description should be written in headwords and not in continuous text. Thereby the participants get a better understanding of the concepts and the headwords serve as a reference for understanding the evaluation criteria in the matrix. These changes, in combination with a more detailed description of the evaluation criteria would lead to a better understanding of the concepts and thereby to a better quality of the workshop results. Furthermore a test run with an example was found useful to increase the participants understanding of the method.

## 6 Conclusion

In a first step a comprehensive method integrating different aspects of methods of classical product and service development has been developed and tested. Due to these first insights a new method based on the utility analysis has been proposed and evaluated in an expert workshop. The overall critique has been positive with few changes emphasized. The main identified challenge is an adequate description of the concept to enable a distinct evaluation. In particular for early development phases only few or no data, examples and models exist. Therefore, the evaluation method has to be compared with other approaches in which the concepts are presented more realistic. *Exner et al.* [3] propose a realistic experience in Virtual Reality with physical prototypes and digital models.

## Literature

- [1] Meier, Horst; Uhlmann, Eckart: *Hybride Leistungsbündel – ein neues Produktverständnis*. In: Meier, H.; Uhlmann, E. (eds.): *Integrierte Industrielle Sach- und Dienstleistungen. Vermarktung, Entwicklung und Erbringung hybrider Leistungsbündel*. Berlin: Springer, 2012. – ISBN 978364225268-6
- [2] Müller, Patrick: *Integrated Engineering of Products and Services*. In: Stark, R. (ed.): *Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin*. Stuttgart: Fraunhofer, 2014. – ISBN 9783839605493
- [3] Exner, Konrad; Lindow, Kai; Buchholz, Christian; Stark, Rainer: *Validation of Product-Service Systems – A Prototyping Approach*. In: ElMaraghy, H. (ed.): *Product Services Systems and Value Creation. Proceedings of the 6th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems. Volume 16*. Elsevier, 2014. – DOI 10.1016/j.procir.2014.03.004. p. 68-73
- [4] Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinz: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin: Springer, 2013. – ISBN 978364229568-3
- [5] VDI-Richtlinie, VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik: *VDI 2225 Blatt 3 Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Technisch-wirtschaftliche Bewertung*. Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung, 1998
- [6] Akao, Yoji: *Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements Into Product Design*. New York: Productivity Press, 2004. – ISBN 9781563273131
- [7] Griffin, Abbie: *Evaluating QFD's use in US firms as a process for developing products*. In: Hustad, T. P. (ed.): *Journal of Product Innovation Management. Volume 9. Product Development & Management Association*, 1992. - DOI 10.1111/1540-5885.930171. p. 171-187
- [8] Berger, Charles; Blauth, Robert; Boger, David; Bolster, Christopher; Burchill, Gary; DuMouchel, William; Pouliot, Fred; Richter, Reinhart; Rubinoff, Allan; Shen, Diane; Timko, Mike; Walden, David: *Kano's Method for Understanding Customer-defined Quality*. In: Walden, D. (ed.): *Center for Quality of Management Journal. Volume 2, Number 4*. Cambridge: The Center for Quality of Management, Inc., 1993. ISSN – 10725296. p. 3-36
- [9] Steward, Don: *The design structure system: A method for managing the design of complex systems*. In: Rubenstein, A. (ed.): *Engineering Management, IEEE Transactions on. Volume 28. IEEE*, 1981. – DOI: 10.1109/TEM.1981.6448589. p. 71-74
- [10] Spiess, Harry; von Allmen, Markus; Sampietro, Thea Weiss: *Szenarien: Wertschöpfung und Transferzahlungen im Jahre 2030 im Schweizer Alpenraum*. In: *Projekt FUNalpin, Arbeitsbericht 7*. St. Gallen: Forschungsstelle für Wirtschaftsgeographie und Raumordnungspolitik, 2005. – ISBN 9783905643077
- [11] Müller, Patrick; Kebir, Noara; Stark, Rainer; Blessing, Lucienne: *PSS Layer Method - Application to Microenergy Systems*. In: Sakao, Tomohiko; Lindahl, Mattias (eds.): *Introduction to Product/Service-System Design*. Berlin: Springer, 2009. – ISBN: 9781848829084. pp. 3-30

## Modularisierung – Entwicklungsmethodik für die Praxis

Kevin Schmitz, Johannes van der Beek, Jörg Feldhusen

LEHRSTUHL UND INSTITUT FÜR ALLGEMEINE  
KONSTRUKTIONSTECHNIK DES MASCHINENBAUS, RWTH AACHEN University  
Steinbachstraße 54 B, D-52070 Aachen  
E-Mail: [schmitz@ikt.rwth-aachen.de](mailto:schmitz@ikt.rwth-aachen.de); Internet: <http://www.ikt.rwth-aachen.de>

**Inhalt:** In vielen Bereichen des Maschinenbaus wird Modularisierung mittlerweile als erfolgsbringendes Mittel zukunftsweisender Produktentwicklung proklamiert. Die Vorteile modular aufgebauter Produkte reichen von der Parallelisierung von Prozessschritten über eine verringerte Teilevielfalt hin zu einem geringeren Prüfaufwand von Gesamtsystemen. Dem gegenüber werden teilweise zusätzliche Schnittstellen erforderlich, die Anzahl an Bauteilen steigt und damit einhergehend auch der Bauraumbedarf. Modularisierung macht eine Standardisierung auf einzelnen Ebenen der Systemhierarchie (Bauteil, Baugruppe, Modul, Gerät, Anlage) erforderlich. Während sich auf Bauteilebene aufgrund geringer Komplexität Standardisierungsmaßnahmen etwa durch das Verwenden von Gleichteilen mit überschaubarem Aufwand realisieren lassen, ist die Umsetzung auf der Modulebene schwieriger, geht jedoch aufgrund von Skaleneffekten in der Regel mit größeren Kosteneinsparungen einher. Es wird deutlich, dass für jedes Produkt individuell eine optimale Anzahl an Modulen gefunden und ideale Modulgrenzen definiert werden müssen.

In diesem Beitrag wird eine Methodik aufgezeigt, die aus der praktischen Anwendung in diversen Industrieprojekten heraus entwickelt und abstrahiert wurde. Sie bietet die Möglichkeit, variantenreiche Produkte zu analysieren und den Anwender dabei zu unterstützen, diese in eine modulare Produktstruktur zu überführen. Im Speziellen hilft die Methodik, eine geeignete Anzahl von Modulen zu generieren und deren Schnittstellen so zu definieren, dass voneinander unabhängig entwickel-, konstruier-, fertig- und prüfbare Einheiten entstehen. Eine der Herausforderungen bei der praktischen Umsetzung ist es, die funktionalen und baulichen Abhängigkeiten zwischen einzelnen Funktionsmerkmalen zu identifizieren. Im Beitrag wird hierzu die softwaregestützte Erzeugung von Variantenbäumen aus Design Structure Matrizen vorgestellt. Neben der Visualisierung zur disziplinübergreifenden Kommunikation, umfasst die Methodik auch eine kombinatorische Optimierung der Module.

**Abstract:** In many fields of mechanical engineering, modularisation is declared as a successful tool of future-oriented product development. Some of the advantages of modular products are the parallelization of process steps, a minimisation of diversity in the product parts as well as lower effort for testing of systems. On the other hand it produces a need of additional interfaces, a rise of parts and therefore of need for more space. Modularisation calls for a standardisation on different levels of the system hierarchy (part, assembly, module, device, system). Regarding the level of parts, standardisation can be realised relatively easy through the use of carry-over parts. On the level of single modules the realisation is more difficult but has a

*greater influence on the reduction of costs, due to scale effects. It is obvious, that the optimal quantity of modules and ideal dividing lines have to be found for each individual product.*

*The present paper describes a methodology, which was developed and abstracted in multiple collaborations with the industry and direct practical application. It offers an option to analyse multi-variant products and supports the user to transfer them into a modular product structure. Especially the methodology helps generating an accurate number of moduls and to define interfaces, which are independent regarding the development, construction, manufacturing and testing processes. One of the main challenges of the practical application is the identification of functional and structural dependencies between single features. The paper introduces the software-based generation of variant trees out of Design Structure Matrices. Additional to across discipline communication the methodology includes a combinatorial optimisation of the modules.*

**Stichwörter:** *Modularisierung, Standardisierung, Methodik, Variantenbaum*

**Keywords:** *modularisation, standardisation, methodology, variant tree*

## 1 Einleitung

Modularisierung wird in vielen Bereichen des Maschinenbaus als ein erfolgsbringendes Mittel in der Produktentwicklung angesehen. Die Vorteile modular aufgebauter Produkte sind vielfältig und reichen von einer verringerten Teilevielfalt über eine Parallelisierung von Prozessschritten hin zu verringerten Aufwänden zur Prüfung von Gesamtsystemen. Auch Logistik- und Beschaffungsprozesse lassen sich durch eine modulare Produktarchitektur optimieren, indem durch die Definition präziser Schnittstellen größere Umfänge an Systemlieferanten übergeben werden können. Weiter lassen sich durch eine reduzierte Varianz über Stückzahleffekte Einsparungen bei den Materialkosten realisieren [1]. Dem gegenüber bringt die Modularisierung aber auch eine Reihe von Nachteilen mit sich. So erhöht sich in der Regel die Anzahl an Schnittstellen, womit einhergehend die Bauteilanzahl steigt. Gleichzeitig ist oft ein erhöhter Bauraumbedarf bei modularisierten Produkten festzustellen. Letztlich ist der Aufwand, den eine Umstellung von einer konventionellen Produktarchitektur auf eine modulare oftmals sehr groß. Es wird deutlich, dass für jedes Produkt individuell abgewogen werden muss, ob eine Modularisierung sinnvoll ist.

Dieser Beitrag wird eine Methodik mit konkreten Handlungsanweisungen aufzeigen. Diese wird, ausgehend von einer Produktlebenszyklusanalyse, die sowohl interdisziplinäres Wissen als auch Produktdaten mit einbezieht über eine Produktplanung und ein Variantenmanagement als Output einen Variantenbaum zur Produktkonfiguration erzeugen.

## 2 Produktlebenszyklusanalyse

In vielen Fällen setzt eine Produktentwicklung auf ein bestehendes Produkt auf. So wird das Produkt als Anpassungskonstruktion mit gleichem Lösungsprinzip an neue Randbedingungen wie beispielsweise neue Technologien angepasst [1]. Um das vorhandene Produktwissen ideal in den Konstruktionsprozess einfließen lassen zu können, ist eine systematische Produktanalyse sinnvoll.

### 2.1 Workshops und Produktschulungen

In den Produktentstehungsprozess fließt idealerweise die Erfahrung vorangegangener Entwicklungen ein. Das Produktwissen liegt im Unternehmen verteilt vor und lässt sich in die drei Bereiche *Unternehmenswissen*, *Produktionswissen* und *Entwicklungs- und Konstruktionswissen* einteilen [1]. Das *Unternehmenswissen* umfasst unternehmensstrategische Einflüsse auf die Produktgestaltung, während das *Produktionswissen* Informationen über die Herstellbarkeit von Features und Daten zu Kosten beinhaltet [1]. Das *Entwicklungs- und Konstruktionswissen* umfasst neben Daten und Informationen über die Eigenschaften von Features auch Regeln ihrer Kombinierbarkeit [1]. Es wird deutlich, dass das Produktwissen auf eine Vielzahl von Personen unterschiedlicher Abteilungen verteilt ist und daher aktiv zusammengetragen werden muss. Zunächst muss im Rahmen der Produktplanung das Unternehmenswissen in Meetings der Unternehmensleitung herangezogen werden, um eine klare Strategie für das zu entwickelnde Produkt festlegen zu können. Weiter wird das Produktionswissen, das zum Teil digital in Produktdatenmanagement-Systemen vorliegt, ausgewertet sowie die Machbarkeit und insbesondere die Notwendigkeit einzelner Produktausprägungen im Rahmen von Meetings und anhand von Verkaufszahlen abgesichert. Im Bereich des Entwicklungs- und Konstruktionswissens haben sich interdisziplinäre Workshops als zielführend erwiesen. Diese werden durch einen Moderator geleitet und sollten eine Länge von zwei Stunden nicht überschreiten. Inhaltlich wird insbesondere die technische Machbarkeit der im Vorfeld festgelegten und zu realisierenden Produktausprägungen diskutiert. Hierbei stehen die baulichen Zusammenhänge und funktionale Abhängigkeiten einzelner Baugruppen im Vordergrund. Um ein abteilungsübergreifendes Wissen zu schaffen, ist die regelmäßige Teilnahme an interdisziplinären Produktschulungen hilfreich. Konkret kann beispielsweise ein Konstrukteur in einer haus-eigenen Serviceschulung, die ursprünglich für Kunden konzipiert war, viel über die Ver-

besserungspotentiale der Konstruktion hinsichtlich der Servicefreundlichkeit lernen. Insbesondere der direkte Kontakt zwischen Kunden und Schulungsleitern bietet eine wertvolle Quelle, durch die konstruktives Feedback zurück an das Unternehmen gegeben wird. Oftmals gelangt dieses Wissen aber nicht in die Fachabteilungen, weshalb vor allem interdisziplinäre Produktschulungen großes Potential für Verbesserungen zukünftiger Produkte bergen.

## **2.2 Datenanalyse**

Ein großer Vorteil von modular aufgebauten Produkten ist, dass sie an verteilten Standorten entwickelt und konstruiert werden können. Hierzu ist es erforderlich, alle Modulschnittstellen zu analysieren und gegebenenfalls zu definieren. Diese Daten sollten im Weiteren digital, beispielsweise in Form von Skelett-Modellen verfügbar gemacht werden. Moderne Produktdatenmanagement-Systeme können dabei unterstützen, Änderungen zu erfassen und in Form von Iterationen zu protokollieren. Darüber hinaus spielen vorwiegend bei Consumer-Produkten das Design und formalästhetische Aspekte eine große Rolle im Produktentstehungsprozess. Dies macht oftmals eine Modellierung von außen nach innen notwendig. Moderne CAD-Systeme bieten hierzu auch in frühen Entwicklungsphasen schon die Möglichkeit, erste Bauraumanalysen durchzuführen. Hierzu können Skelett-Modelle aufgebaut werden und bei kinematischen Systemen gekoppelte Bewegungs- und Überschneidungsanalysen durchgeführt werden, um die Machbarkeit einzelner Produktausprägungen zu be- oder widerlegen.

## **3 Produktplanung und Variantenmanagement**

Für eine strukturierte Produktoptimierung ist es notwendig, alle Erkenntnisse aus der Produktanalysephase in einer Form aufzubereiten, die für jedermann schnell verständlich ist und damit die Erkenntnisse kommunizierbar macht. Bei der Definition von modularen Produktstrukturen besteht eine essentielle Aufgabe darin, Abhängigkeiten zwischen einzelnen Funktionsmerkmalen zu identifizieren. Diese können aus funktionalen oder baulichen Aspekten resultieren, aber auch kundenseitigen Forderungen oder Wünschen entspringen.

### 3.1 Design Structure Matrix

Die Design Structure Matrix (DSM) ist eine Methode, mit der sowohl die Analyse hochkomplexer Strukturen durchgeführt als auch eine Optimierung und Synthese dieser unterstützt werden kann [2]. Sie bietet die Möglichkeit, Bezüge und Abhängigkeiten zwischen Elementen auf einfache Weise zu erfassen und zu visualisieren. DSMs werden in der Modellierung von Produktarchitekturen eingesetzt, finden aber auch häufig in der Prozessoptimierung Anwendung.

Eine Design Structure Matrix ist eine quadratische Matrix, die alle Elemente des Systems sowohl auf der vertikalen als auch auf der horizontalen Achse beinhaltet. Im Falle einer binären DMS wird nur eine Abhängigkeit zweier Elemente erfasst und durch eine 1 in der gemeinsamen Zelle abgebildet. Um im Rahmen einer Produktentwicklung die Abhängigkeiten einzelner Funktionsmerkmale (FM) in einer DSM zu visualisieren werden diese, wie in Abbildung 1 dargestellt, als Elemente auf den beiden Achsen eingetragen. Die Abhängigkeit einzelner Funktionsmerkmale voneinander werden durch ein „x“ in der gemeinsamen Zelle erfasst. Die mit dieser Methodik erfassten Abhängigkeiten sind unidirektional und in einer DSM sind Spaltenelemente von Zeilenelementen abhängig. Dies hat zur Folge, dass die Design Structure Matrix nur oberhalb ihrer Diagonalen mit Einträgen versehen wird. Aus gezeigtem Beispiel folgt eine Abhängigkeit von FM 3 und FM 6 von FM 1. FM 6 selbst ist neben FM 1 auch von FM 3 abhängig.

|                    | Funktionsmerkmal 1 | Funktionsmerkmal 2 | Funktionsmerkmal 3 | Funktionsmerkmal 4 | Funktionsmerkmal 5 | Funktionsmerkmal 6 | Funktionsmerkmal 7 |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Funktionsmerkmal 1 |                    |                    | x                  |                    |                    | x                  |                    |
| Funktionsmerkmal 2 |                    |                    |                    |                    |                    |                    | x                  |
| Funktionsmerkmal 3 |                    |                    |                    |                    |                    | x                  |                    |
| Funktionsmerkmal 4 |                    |                    |                    |                    | x                  |                    |                    |
| Funktionsmerkmal 5 |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Funktionsmerkmal 6 |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Funktionsmerkmal 7 |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |

Abbildung 1: Design Structure Matrix

Die Beziehungen von Elementen zu sich selbst, die auch als reflexive Beziehungen bezeichnet werden, werden nicht abgebildet. Die Diagonale einer DSM ist daher immer leer.

### 3.2 Moduldefinition

Einheiten, die ein oder mehrere Funktionsmerkmal(e) komplett oder teilweise in sich abbilden, werden oftmals unter dem Begriff *Baugruppe* geführt. Definitionsgemäß handelt es sich um in sich geschlossene, aus zwei oder mehr Teilen und/oder Gruppen niedriger Ordnung bestehende Gegenstände, ohne die das Gesamtsystem gar nicht oder nur eingeschränkt funktionieren kann [3]. Oftmals bilden Baugruppen Funktionsmerkmale nicht vollständig ab. In diesem Fall werden weitere Bauteile oder Baugruppen erforderlich, zu denen dann eine Abhängigkeit besteht. Gelingt es, auf den Systemebenen Mechanik, Elektronik und Software funktional und physisch unabhängige Einheiten zu erzeugen, werden diese als Module bezeichnet [1]. Diese Unabhängigkeit ermöglicht eine Vorprüfbarkeit der Module und damit eine Verlagerung der Produktion an verteilte Standorte. Zudem können Module unabhängig voneinander weiterentwickelt werden und im Servicefall ausgetauscht werden. Im vorangegangenen Kapitel 3.1 wird eine Methodik beschrieben, mit der Abhängigkeiten von Funktionsmerkmalen systematisch erfasst werden können. Sollen diese Funktionsmerkmale nun zu Modulen zusammengefasst werden, bietet das Clustern der Design Structure Matrix eine hervorragende Basis dazu. Beim Clustern werden die Funktionsmerkmale so verschoben, dass sich autonome Gruppen dieser ergeben, die zu Modulen zusammengefasst werden können. Hierzu stehen eine Reihe von Algorithmen zur Verfügung [4][5], die diesen Schritt automatisieren lassen. Sie stehen teilweise in Form von MathWorks MATLAB Skripten für Forschungszwecke kostenlos zu Verfügung [5]. Daneben existieren eine Reihe von eigenständigen Softwaretools, die neben dem Clustern noch eine Reihe weiterer Transformationen von DSMs durchführen können.

Wird ein solches Clustering auf die Design Structure Matrix aus Kapitel 3.1 angewendet, ergibt sich die in Abbildung 2 dargestellte Matrix. Es wird deutlich, dass die Reihenfolge der Funktionsmerkmale verändert ist, sodass sich voneinander unabhängige Gruppen bilden lassen. So würden Funktionsmerkmal 1 und 2 in einem ersten Modul abgebildet, FM 4 und FM 5 in einem zweiten und FM 6, FM 1 und FM 3 in einem dritten Modul. Dies bietet die Basis einer Moduldefinition.



|                    | Funktionsmerkmal 2 | Funktionsmerkmal 7 | Funktionsmerkmal 4 | Funktionsmerkmal 5 | Funktionsmerkmal 6 | Funktionsmerkmal 1 | Funktionsmerkmal 3 |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Funktionsmerkmal 2 |                    | x                  |                    |                    |                    |                    |                    |
| Funktionsmerkmal 7 |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Funktionsmerkmal 4 |                    |                    |                    | x                  |                    |                    |                    |
| Funktionsmerkmal 5 |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Funktionsmerkmal 6 |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Funktionsmerkmal 1 |                    |                    |                    |                    | x                  |                    | x                  |
| Funktionsmerkmal 3 |                    |                    |                    |                    | x                  |                    |                    |


Abbildung 2: Design Structure Matrix nach dem Clustering

### 3.3 Modulvarianten

Vielfach sind Module nicht nur in einer Ausführung vorgesehen, sondern individuell konfigurierbar. Bei einem Autositz beispielsweise kann der Kunde oftmals zwischen unterschiedlichen Materialien und Farben der Bezüge und einer elektrischen oder manuellen Sitzverstellung wählen, sodass sich unterschiedliche Modulvarianten ergeben. Es wird deutlich, dass die in Kapitel 3.2 dargestellten Funktionsmerkmale häufig in unterschiedlichen Ausprägungen angeboten werden. Die Anzahl der Modulvarianten ergibt sich daher aus dem Produkt der Anzahl der Ausprägungen jedes Funktionsmerkmals. Aus geht hervor, dass das Modul *Autositz* am Markt in  $4 \times 2 \times 2 = 16$  Varianten angeboten werden soll.

In Kapitel 3.2 wurden Abhängigkeiten zwischen Funktionsmerkmalen zur Moduldefinition herangezogen. Werden diese Relationen, die sowohl aus funktionalen und baulichen Aspekten, als auch kundenseitigen Anforderungen resultieren können, im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses spezifiziert, kann dadurch die Anzahl der Modulvarianten gesenkt werden. Ein Beispiel wäre, wenn zwischen dem Funktionsmerkmal *Sitzheizung* und dem Funktionsmerkmal *Sitzbezug* eine funktionale Abhängigkeit bestünde und die Sitzheizung technisch nur mit Ledersitzen zu realisieren wäre.

Tabelle 1: Modulvarianten am Beispiel eines Autositzes



| Funktionsmerkmal | Ausprägung   | Anzahl Ausprägungen |
|------------------|--|---------------------|
| Sitzbezug        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Stoff (schwarz)</li> <li>- Stoff (grau)</li> <li>- Leder (schwarz)</li> <li>- Leder (grau)</li> </ul> | 4                   |
| Sitzverstellung  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elektrisch</li> <li>- Manuell</li> </ul>  | 2                   |
| Sitzheizung      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ja</li> <li>- Nein</li> </ul>   | 2                   |

Daraus würde sich die Anzahl der Varianten des Moduls *Autositz* auf 12 reduzieren. Es wird deutlich, dass Abhängigkeiten von Funktionsmerkmalen nicht nur aufgrund einer stets angestrebten unabhängigen Entwickel-, Konstruier-, Prüf-, und Fertigbarkeit innerhalb eines Moduls abgebildet werden müssen, sondern auch um die Anzahl der Modulvarianten zu reduzieren. Eine nicht durchdachte Definition der Modulgrenzen hat daher weitreichende Folgen.

### 3.4 Variantenbaum

Ein Variantenbaum ist eine Methodik zur Darstellung von varianten Strukturen. Er wird von links nach rechts entlang einzelner Pfade durchlaufen und visualisiert den Produktkonfigurationsprozess, wobei jeder Pfad einer Konfiguration entspricht. Der Variantenbaum kann auch für einzelne Baugruppen oder Module verwendet werden.

Die Visualisierung der mithilfe einer Design Structure Matrix definierten Module und deren Ausprägungen ist mit entsprechender Software leicht möglich. Ein für diesen Zweck vielfach bewährtes und online frei verfügbares Tool ist der yEd Graph Editor [6]. Das Programm ermöglicht das Visualisieren von Tabellendaten in Baumstrukturen und damit das Erzeugen von Variantenbäumen. Die Design Structure Matrix aus Kapitel 3.1 liefert die in Abbildung 3 dargestellten Baumstrukturen.

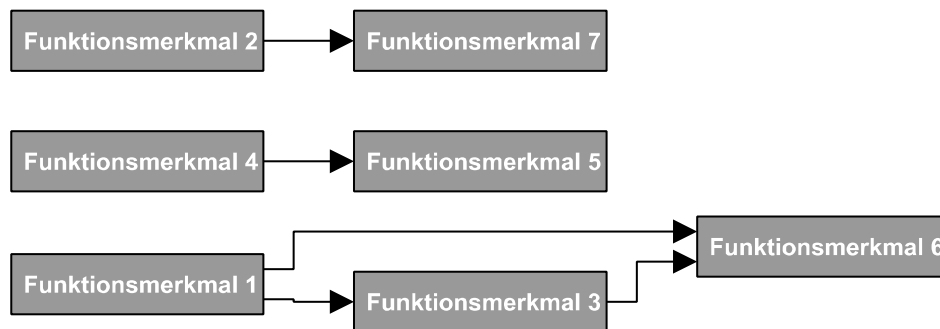


Abbildung 3: Baumstrukturen der Design Structure Matrix aus Kapitel 3.1

Abhängigkeiten werden in Form von Pfeilen, die von links nach rechts verlaufen, dargestellt. Die gefundenen unabhängigen Gruppen stimmen mit denen, die mittel Clustering in Kapitel 3.2 ermittelt wurden, überein. Auf ähnliche Weise lässt sich ein Variantenbaum erzeugen. Hierzu wird die Design Structure Matrix um alle Ausprägungen der Funktionsmerkmale erweitert und die Abhängigkeiten werden ausprägungsspezifisch in die Matrix geschrieben. In Abbildung 4 ist dies exemplarisch für das dritte Modul aus Kapitel 3.2 dargestellt. Dieses bildet die Funktionsmerkmale 6, 1 und 3 ab.

|      |               | FM 2 | FM 7 | FM 4 | FM 5 | FM 6          |               |               | FM 1          |               |               | FM 3          |               |               |
|------|---------------|------|------|------|------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|      |               |      |      |      |      | Ausprägung 6a | Ausprägung 6b | Ausprägung 6c | Ausprägung 1a | Ausprägung 1b | Ausprägung 1c | Ausprägung 3a | Ausprägung 3b | Ausprägung 3c |
| FM 2 |               |      | x    |      |      |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| FM 7 |               |      |      |      |      |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| FM 4 |               |      |      |      | x    |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| FM 5 |               |      |      |      |      |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| FM 6 | Ausprägung 6a |      |      |      |      |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
|      | Ausprägung 6b |      |      |      |      |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
|      | Ausprägung 6c |      |      |      |      |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| FM 1 | Ausprägung 1a |      |      |      |      | x             | x             |               |               |               |               | x             | x             |               |
|      | Ausprägung 1b |      |      |      |      |               |               | x             |               |               |               |               | x             | x             |
|      | Ausprägung 1c |      |      |      |      |               | x             |               |               |               |               |               |               | x             |
| FM 3 | Ausprägung 3a |      |      |      |      |               | x             |               |               |               |               |               |               |               |
|      | Ausprägung 3b |      |      |      |      | x             |               | x             |               |               |               |               |               |               |
|      | Ausprägung 3c |      |      |      |      |               | x             |               |               |               |               |               |               |               |

Abbildung 4: Design Structure Matrix mit ausprägungsspezifischen Abhängigkeiten

Die zugehörige Baumstruktur ist in Abbildung 5 dargestellt. Sie visualisiert die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Ausprägungen und es wird deutlich, dass merkmalsübergreifende Abhängigkeiten vorhanden sind. So sind die Ausprägungen von Funktionsmerkmal 6 sowohl von 3 als auch von 1 abhängig.

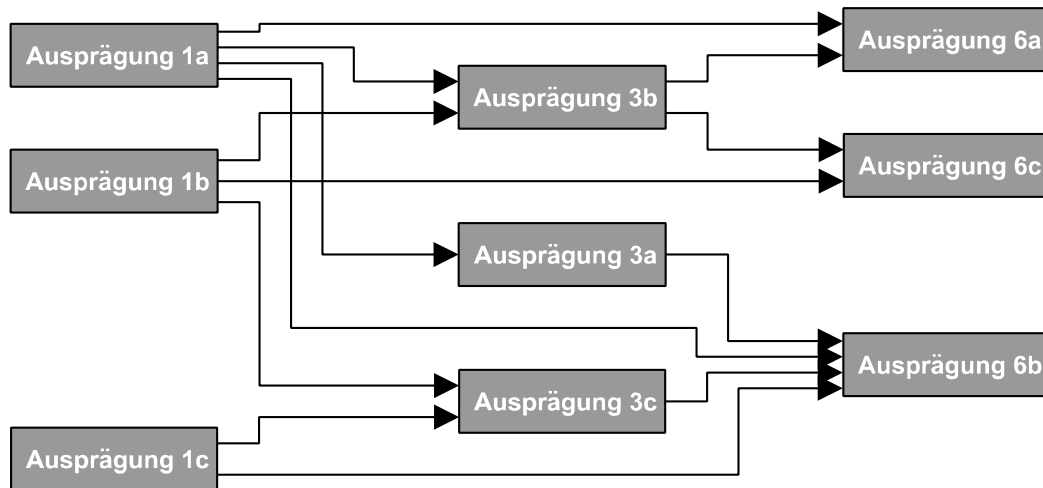


Abbildung 5: Baumstruktur der Abhängigkeiten des dritten Moduls (FM 1, FM 3, FM 6)

Da ein Variantenbaum prinzipbedingt nicht in der Lage ist, merkmalsübergreifende Abhängigkeiten abzubilden, müssen diese Abhängigkeiten durch entsprechende Labels an den Pfaden kenntlich gemacht werden. In Abbildung 6 ist der vollständige Variantenbaum des zuvor beschriebenen Moduls dargestellt. Die Pfade mit den Labels dürfen nur durchlaufen werden, wenn die genannte Bedingung erfüllt ist.

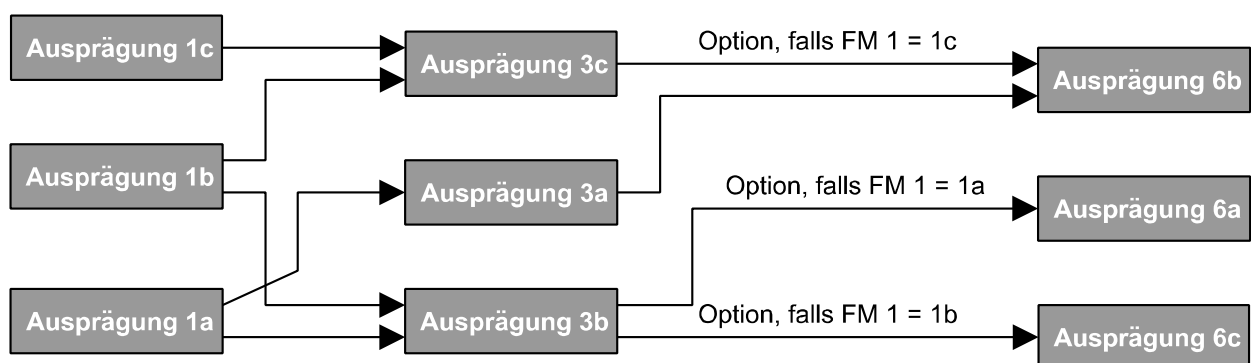


Abbildung 6: Variantenbaum des dritten Moduls (FM 1, FM 3, FM 6)

## 4 Fazit und Ausblick

Der Variantenbaum als Output der vorgestellten Methodik dient der Visualisierung der Produktkonfiguration. Er setzt voraus, dass alle Varianten eines Produktes festgelegt sind und dient daher als Werkzeug zur Validierung der Produktsstruktur. Weiter ist er intuitiv zu lesen und dient damit der interdisziplinären Kommunikation im Unternehmen. Auch dem Vertrieb dient er als Grundlage für Kundenbestellungen und zeigt auf, was in Zukunft über die modulare Produktstruktur abgebildet werden kann und was als etwaige Sonderbestellung gesondert berechnet oder abgelehnt werden muss.

Die Methodik ist praxiserprobt und durchgängig. Die bei manchen Produkten auftretenden übergreifenden Abhängigkeiten zwischen mehreren Funktionsmerkmalen lassen sich aber noch nicht ideal abbilden. Darüber hinaus sind bidirektionale Abhängigkeiten nicht abbildbar, was bei den Industrieprojekten, bei denen die Methodik bisher zum Einsatz kam, auch nicht erforderlich war. Insbesondere an diesen Stellen sollte die Methodik weiterentwickelt werden.

## Literatur

- [1] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre : Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Aufl. Berlin: Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-29569-0
- [2] Browning, T.R.: Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. Engineering Management, IEEE Transactions on (Volume:48 , Issue: 3 ) Fort Worth, TX, USA: 2001
- [3] Norm DIN 6789 10.13. *Dokumentationssystematik*
- [4] Börjesson, Fredrik, Hölttä-Otto, Katja: *Improved Clustering Algorithm for Design Structure Matrix*. Conference paper (Refereed). Houston (Texas): ASME, 2012.
- [5] Thebeau, Ronnie E.: *Knowledge Management of System Interfaces and Interactions for Product Development Processes*. Master Thesis. Cambridge (Massachusetts): MIT, 2001.
- [6] yEd Graph Editor: <http://www.yworks.com/de/> Tübingen: yWorks GmbH, 2014



# Einsatz virtueller und experimenteller Methoden im Produktentwicklungsprozess von Effektoren für technische Textilien

Martin Rolbiecki, Jan-Hendrik Ohlendorf, Klaus-Dieter Thoben

Institut für integrierte Produktentwicklung (BIK), Universität Bremen  
Badgasteiner Str. 1, 28359 Bremen  
E-Mail: rolbiecki@uni-bremen.de; Internet: www.bik.uni-bremen.de

**Inhalt:** In diesem Papier soll der Einsatz virtueller und experimenteller Methoden im Produktentwicklungsprozess am Beispiel von Handhabungsvorrichtungen für technische Textilien thematisiert werden. Das BIK beschäftigt sich bereits seit längerer Zeit mit dem Produktentwicklungsprozess von Effektoren für die Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV). Durch automatisierte Produktionsprozesse sollen Produktionskosten für FKV gesenkt und deren Qualität gesteigert werden. Die Handhabung und der Lagenaufbau von technischen Textilien stellt dabei ein wesentliches Automatisierungspotenzial dar. Eine besondere Herausforderung für den Produktentwicklungsprozess der Effektoren ergibt sich durch die biege- und schubweiche Materialcharakteristik der textilen Halbzeuge. Dieser lässt sich mit der Kombination von virtuellen als auch experimentellen Methoden im Produktentwicklungsprozess erfolgreich begegnen. Das sehr schwer zu beschreibende bzw. zu modellierende Materialverhalten der biege- und schubweichen Textilien lässt sich nur mit sehr hohem Aufwand in einem numerischen System abbilden. Diese Modelle stoßen schnell an ihre Grenzen, da sie nur begrenzt dynamische Prozessfaktoren abbilden. Auch eine Integration der Materialmodelle in die Konstruktionsumgebung eines CAD-Systems ist aktuell nur schwer umsetzbar. Eine experimentelle Untersuchung des Materialverhaltens unter realen Bedingungen bietet daher die Möglichkeit, verschiedene Konzeptvarianten qualitativ zu bewerten. Besonders wichtig hierbei ist eine realitätsnahe Skalierung der Versuchsvorrichtungen. Deshalb kann der Produktentwicklungsprozess, insbesondere im Anwendungsbereich von biege- und schubweichen Materialien, nur in Kombination aus virtuellen und experimentellen Methoden erfolgreich abgeschlossen werden.

**Abstract:** This Article is focused on virtual and experimental methods of product development using the example of handling devices for textiles. The BIK is working on the product development of effectors for the production of fibre-reinforced plastic (FRP). Automation can help for lower product costs and increase the product quality of the FRP. Especially the handling process of technical textiles and the build-up of fibre structures represents a significant potential for automation. A particular challenge for the product development process of handling devices is determined by the limp material characteristics of textiles. Because of this there is the need to use both virtual and experimental methods in the product development process. The

*material behaviour of textiles is very difficult to describe in a numerical model. These models quickly reach their limits, since they represent only limited dynamic process factors. Also an integration of the material models in the environment of a CAD system is currently difficult to implement. Therefore an experimental investigation of material behaviour under real conditions provides the opportunity to evaluate alternative concepts. A realistic scaling of the experimental devices is of particular importance. The product development process, especially in the scope of textiles, can only be successful in combination of virtual and experimental methods.*

**Stichwörter:** Produktentwicklung, virtuell, experimentell, biegeweich, Material, Automatisierung, Handhabung, FKV.

**Keywords:** product development ,experimental methods, virtual methods, textiles, limp materials, automation, handling, FRP.

## 1 Einleitung

Die Produktion von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden ist nach wie vor sehr stark durch manuelle Prozesse geprägt. Allgemein betrachtet kann der Produktionsprozess von FKV in folgende wesentliche Prozessschritte gegliedert werden: Aufbau der textilen Verstärkungsstruktur, Infiltration der Kunststoffmatrix sowie die Montage und Endbearbeitung. Durch Automatisierung einzelner Prozessschritte kann die Fertigung von FKV im Hinblick auf Zeit, Kosten und Qualität deutlich optimiert werden. Der Prozessschritt des Aufbaus der textilen Verstärkungsstruktur stellt eine besondere Herausforderungen für die Entwicklung von Automatisierungslösungen dar. Hierfür sind automatisierte Handhabungsvorrichtungen notwendig, mit deren Hilfe die textilen Faserhalbzeuge definiert aufgenommen, transportiert und wieder positioniert (drapiert) werden. Die besondere Eigenschaft der Faserhalbzeuge ist ihre Biege- und Schubweichheit. Im Wesentlichen werden die Faserhalbzeuge in Multiaxialgelege, Gewebe und Prepreg unterschieden. Diese Halbzeuge werden dem Produktionsprozess als auf Rollen gewickelte Bahnware zugeführt. Während Prepreg-Bahnen aufgrund der vorimprägnierten Matrix eine verhältnismäßig hohe Biege- und Schubsteifigkeit besitzen, sind Gewebe und Gelege äußerst biege- und schubweich. Diese Eigenschaften variieren zudem mit dem strukturellen Aufbau der textilen Halbzeuge selbst. Dies bedeutet besondere Anforderungen für die Produktentwicklung von Handhabungsvorrichtungen für textile Halbzeuge aufgrund der äußerst variablen und sich im Prozess ändernden Charakteristik.



## **2 Problemstellung bei der Produktentwicklung von Handhabungsvorrichtungen für technische Textilien**

Bei der Entwicklung von automatisierten Handhabungsvorrichtungen für textile Halbzeuge, steht der Produktentwickler vor dem Problem, die speziellen Materialeigenschaften in die Produktentwicklungsaufgabe zu integrieren. Der Produktentwicklungsprozess [1] muss sowohl mechanische und elektrische Komponenten bzw. Baugruppen sowie die Handhabungseigenschaften der textilen Halbzeuge berücksichtigen. Diese beiden Ebenen lassen sich jedoch nur schwer mit den gängigen Konstruktions- und Entwicklungswerkzeugen vereinen. Die mechanische Konstruktion erfolgt mithilfe von CAD-Systemen. Diese können jedoch nur unzureichend das zu handhabende textile Halbzeug mit seinen biege- und schubweichen Materialeigenschaften abbilden. Der Prozess zum Aufbau der textilen Struktur für Bauteile aus FKV erfolgt in vielen Fällen sehr dynamisch. Beispielsweise werden textile Bahnen in ein mehrfach gekrümmtes Formwerkzeug positionsgenau abgelegt. Hierzu muss die Handhabungsvorrichtung einer definierten Bahnkurve folgen. Dabei wird das textile Halbzeug abgewickelt und verformt (drapiert), was nur sehr schwer in einem CAD-System abbildbar ist. Aktuell einsetzbare numerische Werkzeuge, die in der Lage sind, Materialeigenschaften, wie die der technischen Textilien, abzubilden können nicht hinreichend in die CAD-Ebene integriert werden. Es ist zwar möglich die Aufgabenstellung zu abstrahieren und bestimmte Fragestellungen in beispielsweise FEM-Modellen abzubilden. Erkenntnisse aus der FEM-Ebene können wiederum in die CAD-Ebene zurückgespielt werden. Allerdings kann diese Vorgehensweise nicht für eine ganzheitliche Entwicklung von automatisierten Handhabungsvorrichtungen genutzt werden. Zudem müsste jedes zu handhabende textile Halbzeug über ein vollständiges Datenmodell der relevanten mechanischen Eigenschaften verfügen.

Die Informationslücke zwischen dem in einem CAD-System entstandenen Modell (geometrisches Modell) und dem tatsächlichen Verhalten des zu handhabenden textilen Halbzeugs ist entsprechend so groß, dass eine Bewertung der technischen Lösung nur ungenau erfolgen kann. An dieser Stelle ist der Entwickler auf Expertenwissen angewiesen. Da jedoch jedes einzelne textile Halbzeug eine unterschiedliche Charakteristik aufweist, können die erforderlichen Informationen nur in praktischen Experimenten genau ermittelt werden. Diese sind teilweise sehr umfangreich, insbesondere, da die textilen

Halbzeuge oft eine stark nichtlineare Materialcharakteristik besitzen. In Abbildung 1 werden die wesentlichen Materialeigenschaften der textilen Halbzeuge dargestellt.

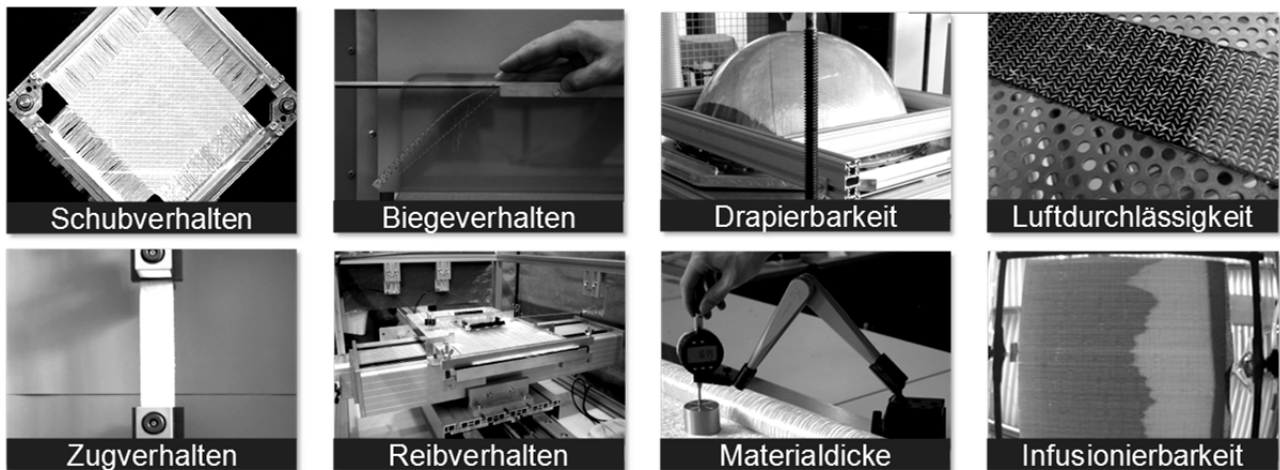


Abbildung 1: Wesentliche Materialeigenschaften von textilen Halbzeugen

Die wesentlichen Materialeigenschaften im Hinblick auf die Handhabung der textilen Halbzeuge werden insbesondere durch die Biegesteifigkeit, das Scherverhalten aber auch durch die Zug-/Druckfestigkeit und die Drapierfähigkeit, bestimmt. Zudem muss auch das Verhalten beim Zuschnitt der textilen Halbzeuge berücksichtigt werden. Insbesondere bei Multiaxialgelegen ist die zuverlässige Bestimmung dieser Materialeigenschaften äußerst schwierig. Um eine standardmäßige Beschreibung durch Methoden und Systematiken für die Eigenschaften von textilen Halbzeugen und Faser-Kunststoff-Verbunde bemüht sich die Forschung (vgl. dazu [2, 3]) ebenso wie verschiedene Werkzeuge des CAx-Prozesses (beispielsweise PAM-QUIKFORM von ESI [4]). Am BIK wird das Ziel verfolgt, ein Modell zu entwickeln, um Prozesse (Materialverhalten, Handhabung, Drapierung) mit textilen Halbzeugen zuverlässig numerisch zu simulieren und die Ergebnisse zukünftig in die CAD-Ebene zu integrieren [5].

Die experimentelle Produktentwicklung wird als Unterstützung zu der virtuellen Produktentwicklung gesehen, in der fehlende Informationen, die insbesondere die Handhabungseigenschaften der textilen Halbzeuge betreffen, geliefert werden. Die Erkenntnisse aus den praktischen Experimenten müssen entsprechend interpretiert werden und für die virtuelle Produktentwicklung aufgearbeitet werden. Diese Vorgehensweise kann unter Umständen mehrere Iterationsschleifen beinhalten, bis das gewünschte Ziel der Produktentwicklung erreicht ist.

### 3 Einsatz der Methoden am Beispiel der Effektorentwicklung

Für die Produktentwicklung für Automatisierungslösungen zur Handhabung von biegeweichen Materialien sind die Anforderungen insbesondere in Bezug auf die stark unterschiedlichen Materialeigenschaften maßgeblich für eine erfolgreiche Lösungsfindung. Insofern können die erforderlichen Kenntnisse für diese Lösungsfindung nicht ausschließlich virtuell erfolgen. Eine Kombination von virtuellen mit experimentellen Methoden der Produktentwicklung ist erforderlich. Diese bauen aufeinander auf und bedingen sich für die erfolgreiche Entwicklung von Automatisierungslösungen für die Handhabung von biege- und schubweichen Materialien. Dieses Vorgehen wird am BIK in verschiedenen Projekten und Forschungsvorhaben erfolgreich praktiziert (vgl. dazu beispielsweise [6, 7]).

In Abbildung 2 ist die Gegenüberstellung von virtueller und experimenteller Produktentwicklung dargestellt. Zu Beginn steht die Aufgabenstellung, die idealerweise gemeinsam mit dem Kunden erstellt wird. Dabei muss die eigentliche Aufgabe möglichst klar definiert sein, so dass eine entsprechende Analyse und Strukturierung in Teilaufgaben ermöglicht wird.

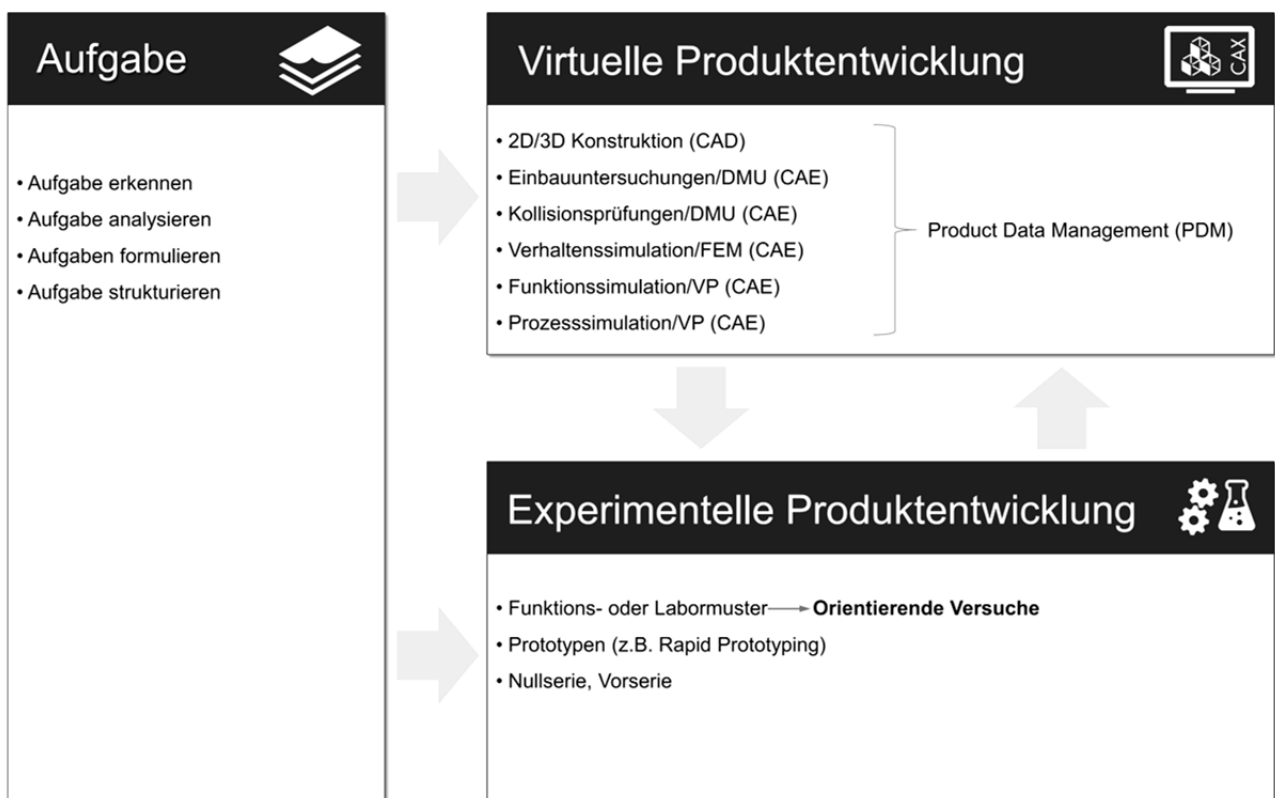


Abbildung 2: Produktentwicklungsprozess mit der Kombination von virtuellen und experimentellen Methoden

### 3.1 Virtuelle Methoden der Produktentwicklung

Als virtuelle Produktentwicklung ist die Gesamtheit der durch Rechner unterstützten Entwicklungsprozesse, die auf einem vollständigen, durchgängigen Datenmodell basieren zu verstehen. Maßgeblich ist dabei die kooperative und parallele Bearbeitung der Entwicklungsprozesse. Dies wird durch verschiedene Softwaretools ermöglicht, beispielsweise CAD-, MKS- und FEM-Programme sowie durch ein durchgängiges und systematisches Daten- und Prozessmanagement. Am BIK werden diese virtuellen Methoden für die Entwicklung von Automatisierungs- und Handhabungslösungen für den faserverstärkten Leichtbau eingesetzt. Wie in Abschnitt 2 beschrieben, wird dazu insbesondere die Kombinationen von 3D-CAD Systemen und numerischen Simulationsprogrammen genutzt [5, 8]. In Abbildung 3 ist dieses Vorgehen exemplarisch für die Entwicklung eines Handhabungseffektors für technische Textilien zum Aufbau von Offshore-Rotorblättern dargestellt.

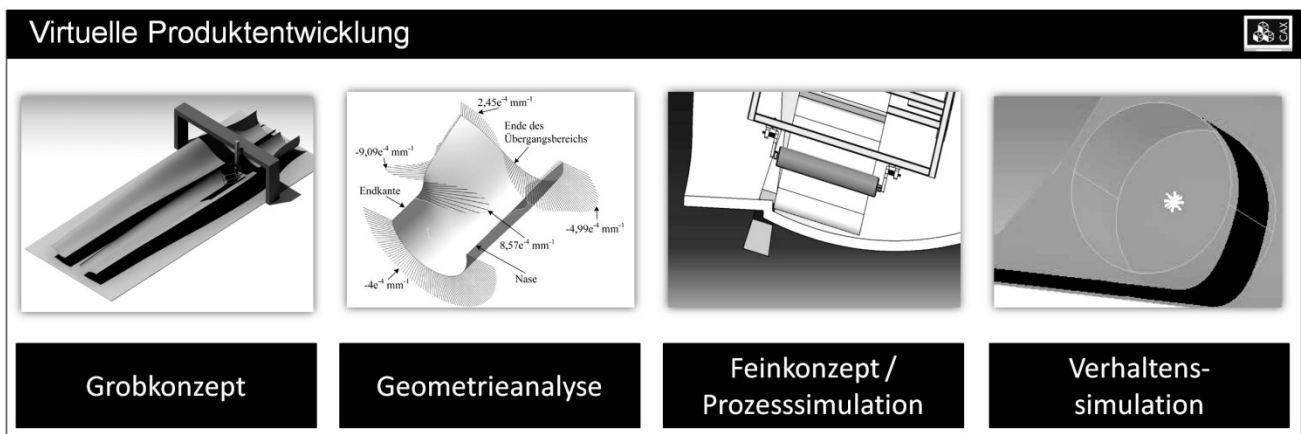


Abbildung 3: Virtuelle Produktentwicklung eines Handhabungseffektors für technische Textilien zum Aufbau von Offshore-Rotorblättern (Grobkonzept, Geometrieanalyse, Feinkonzept / Prozesssimulation, numerische Verhaltenssimulation)

Für den Produktentwicklungsprozess bedeutet dies, dass der konstruktive Entwurf der Handhabungseinrichtung in ein geometrisches und mechanisches Modell zu überführen ist. Dieses Modell ist wiederum in die numerische Simulation zu integrieren, bei der die spezielle Charakteristik der textilen Halbzeuge abgebildet werden. Dieses Vorgehen reicht aktuell aufgrund der in Abschnitt 2 beschriebenen Nachteile eines erforderlichen vollständigen Datenmodells, der damit sehr aufwändigen Erstellung individueller Modelle und der ebenfalls aufwändigen Materialcharakterisierung für jedes technische Textil nicht für einen

erfolgreichen Produktentwicklungsprozess aus. Parallel ist der Einsatz von experimentellen Methoden für die Produktentwicklung erforderlich.

### 3.2 Experimentelle Methoden

Die experimentelle Produktentwicklung wird dann am BIK eingesetzt wenn wesentliche Fragestellungen, die sich aus dem besonderen Materialverhalten der textilen Halbzeuge ergeben, sich nicht allein durch virtuelle Produktentwicklungsmethoden zuverlässig klären lassen. Dabei spielen nicht nur die zum Teil unbekannten mechanischen Materialkennwerte eine Rolle, sondern zusätzlich das Zusammenspiel zahlreicher Effekte bei der Handhabung des Materials. Ähnlich wie bei dem von Ehrlenspiel [9] beschriebenen Wechsel von der Entwurfsebene in den Versuch, wird durch praktische Experimente das unbekannte Materialverhalten unter realen Bedingungen bestimmt. Die benötigten Erkenntnisse und Informationen können nur selten in standardisierten Versuchen ermittelt werden. Die Aufgabenstellung erfordert oftmals sehr spezielle Rahmenbedingungen unter denen das textile Halbzeug gehandhabt wird. Deshalb ist es notwendig, eine speziell für die konkrete Aufgabenstellung spezifizierte Versuchsvorrichtung zu entwickeln und aufzubauen. Für die Bewertung der Materialeigenschaften ist zudem die Erfassung charakteristischer Merkmale mittels geeigneter Messtechnik notwendig. Anders als bei Messvorrichtungen die sehr exakte Materialkennwerte und quantitative Daten liefern, werden für den Zweck der Bewertung der Handhabungseigenschaften stärker qualitative Aussagen benötigt. Für die Unterstützung der Konstruktion durch Experimente werden deshalb "Orientierende Versuche" angewendet [9], die prinzipielle Erkenntnisse für das grundsätzliche Funktionieren von Lösungsansätzen liefern (Abbildung 4).

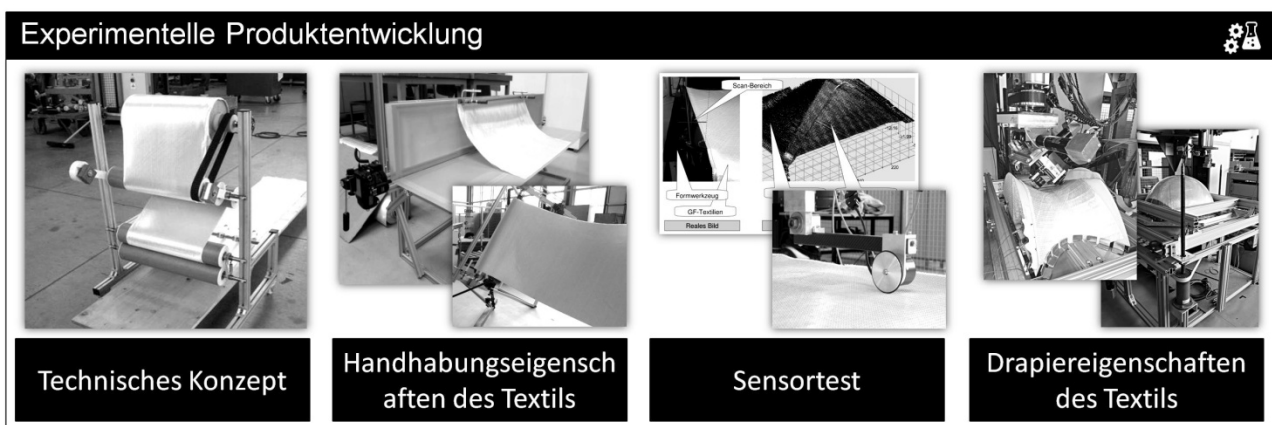


Abbildung 4: Experimentelle Produktentwicklung

Besonders wichtig bei der Handhabung textiler Halbzeuge ist die geometrische Dimensionierung der Experimente. Je näher sich der Versuchsaufbau an den Dimensionen des späteren Einsatzzwecks der Handhabungsvorrichtung orientiert, desto höher ist die Aussagekraft.

### 3.3 Kombination virtueller und experimenteller Methoden der Produktentwicklung

Für den am BIK eingesetzten Produktentwicklungsprozess mit der Kombination von virtuellen und experimentellen Methoden (Abbildung 2) ist der Handhabungseffektor des LAR<sup>i</sup> (vgl. dazu [6]) ein erfolgreiches Beispiel für den Aufbau von FKV für Rotorblätter von Windenergieanlagen. Die maßgeblich Aufgabe, die Drapierung von textilen Halbzeugen zum Aufbau der textilen Verstärkungsstruktur, erfolgt hierbei für die sogenannten Hauptgurte der Rotorblätter.

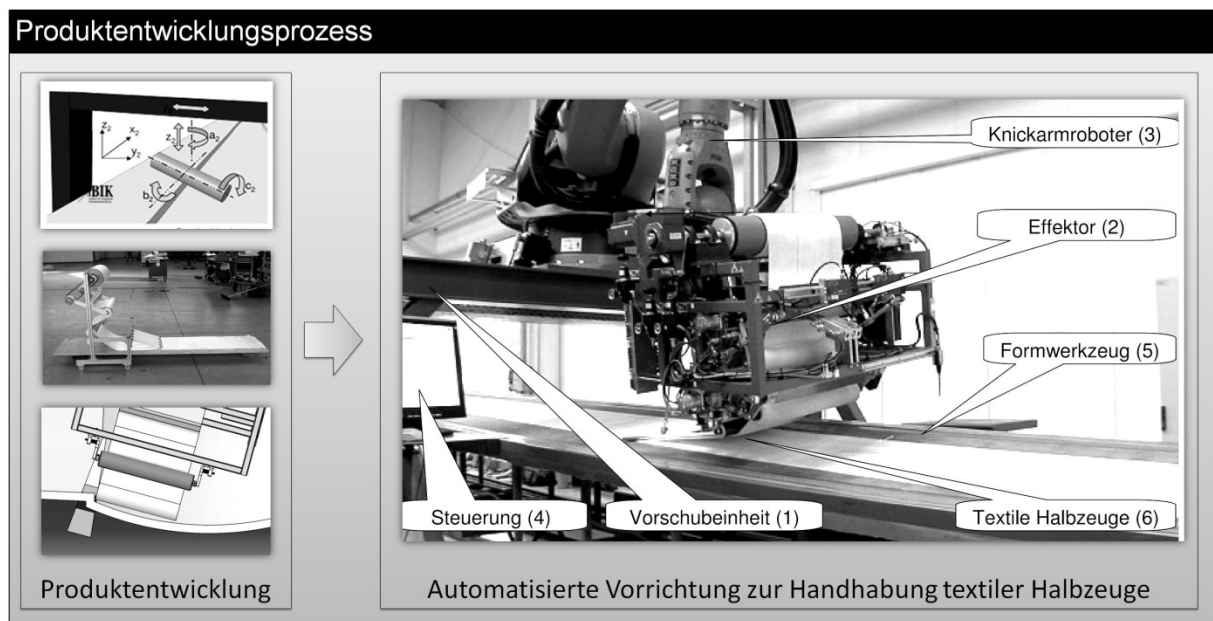


Abbildung 5: Virtueller und experimenteller Produktentwicklungsprozess am Beispiel einer automatisierten Vorrichtung zur Handhabung textiler Halbzeuge (LAR)

In Abbildung 5 ist diese kombinierte Methodik dargestellt. Dabei wurde zu Beginn des Produktentwicklungsprozess ein virtuelles Grobkonzept erarbeitet (vgl. Abbildung 5, links oben), aufbauend erfolgt - ebenfalls virtuell - eine Geometrieanalyse. Für das Fein- bzw. Detailkonzept der Konstruktion (vgl. Abbildung 5, links unten), war eine Prozesssimulation bzw. -analyse erforderlich. Für die Bewertung von technologischen Lösungsansätzen der einzelnen Prozessschritte wurden diese mit Hilfe der experimentellen Produktentwicklung

(vgl. Abbildung 5, links mitte) untersucht. Die Erkenntnisse zu den mechanischen Materialkennwerten sowie zum Zusammenspiel der Effekte von textilem Halbzeug und experimentell simulierter Handhabungsvorrichtung sind maßgeblich in das finale Produkt (vgl. Abbildung 5, rechts) eingeflossen.

Für die Integration der entwickelten Handhabungsvorrichtung in eine automatisierte Anlage ist die eingesetzte Sensortechnik und die nachfolgenden Auswertelgorithmen für die Prozessführung und die Qualitätssicherung von großer Bedeutung. Um die Entscheidung über die Auswahl geeigneter Sensoren im Produktentwicklungsprozess sinnvoll treffen zu können, ist der Einsatz von praktischen Versuchen aufgrund der sehr unterschiedlichen Material- und Oberflächenstrukturen sogar zwingend erforderlich.

## **4 Fazit**

Auf der Basis der kombinierten virtuellen und experimentellen Methoden des Produktentwicklungsprozesses werden am BIK erfolgreich, insbesondere im komplexen Bereich der biege- und schubweichen Handhabung, automatisierte Handhabungsvorrichtungen entwickelt. Es hat sich gezeigt, dass aktuell keiner der beiden methodischen Ansätze allein genügt, um das Ziel einer erfolgreichen und effizienten Produktentwicklung zu erreichen. Ziel sollte zukünftig ein besseres und vollständigeres Datenmodell für den Produktentwicklungsprozess sein, um die aufwändigere experimentelle Methoden zu reduzieren.

Der Einsatz rein virtueller Methoden wird aber in naher Zukunft nicht genügen, um für diesen komplexen Fall, der biege- und schubweichen Handhabungsvorrichtungen eine erfolgreiche und effiziente Produktentwicklung zu gewährleisten.

## Literatur

- [1] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: *Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-34060-7
- [2] LOMOV, S.; IVANOV, D.; VERPOEST, I.; ZAKO, M.; KURASHIKI, T.; NAKAI, H.; HIROSAWA, S.: Meso-FE modelling of textile composites: Road map, data flow and algorithms. In: *Composites Science and Technology* ( 2007), 67, S. 1870-1891.
- [3] CHRIST, M.; HERRMANN, A.S.: Quantifizierung von Drapiereffekten bei Multiaxialgelegen. In: *Tagungsbandbeitrag des 19. Symposiums Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbund der DGM*. Karlsruhe, 2013
- [4] ESI Group, Internetauftritt, Zugriff am 04.09.2014. - <https://www.esi-group.com/software-services/virtual-manufacturing/composites>
- [5] OHLENDORF, J.-H.; MÜLLER, D. H., THOBEN, K.-D.: Entwicklung von Handhabungseinrichtungen für biegeschlaife Materialien – Produkt- und Prozessinnovation durch den Einsatz der Finiten Elemente Methode. In Brökel, K.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Rieg, F.; Stelzer, R.: *8. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (KT2010)*. Magdeburg, 2010, S. 237-242
- [6] ROLBIECKI, M.; WORTHMANN, F.; MAASS, R.; MÜLLER, D. H.; THOBEN, K.-D.: *Large Area Robot - Flexibel automatisierte Produktion großflächiger Faserverbundstrukturen durch mobile Fertigungseinrichtung (02PK2052)*. Institut für integrierte Produktentwicklung, 2009
- [7] OHLENDORF, J.-H.; ROLBIECKI, M.; SCHMOHL, T.; FANKE, J.; THOBEN, K.-D.; ISCHTSCHUK, L.: Innovationen in der Handhabungs- und Textiltechnik zur Rotorblattfertigung. In: *Lightweight Design* (2013), Nr. 6, S. 50-57. <http://dx.doi.org/10.1365/s35725-013-0281-x>.
- [8] OHLENDORF, J.-H.: *Untersuchung der mehrlagigen Umformung von Fasergelegen zur Herstellung von Faserverbundstrukturen*, Universität Bremen, Diss., 2013
- [9] EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*, 5., überarbeitete und erweiterte Auflage, München - Wien: Carl Hanser Verlag, 2013.

---

<sup>i</sup>LAR: Large Area Robot



# Process Analysis and Optimization by Targeted Application of Knowledge Management – A Case Study in the Early Stages of Product Development

A. Albers, R. Lüdcke\*, N. Bursac, J. Will\*

IPEK – Institute of Product Engineering,

Karlsruhe Institute of Technology

Kaiserstraße 10, 76131 Karlsruhe, Germany

E-Mail: {albert.albers, nikola.bursac}@ipek.kit.edu; Internet: <http://www.ipek.kit.edu>

\*Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

Porschestraße 911, 71287 Weissach, Germany

E-Mail: {robert.luedcke, jonathan.will}@porsche.de; Internet: <http://www.porsche.de>

**Abstract:** *The product development process is formed by many interacting activities and is due to design alterations, especially in the knowledge intensive early stages, highly iterative. At this point, an adequate knowledge management is decisive for success. The Activity Based Modeling Technique has been developed to depict interactions and iterations in the product development process and to identify needs for action in order to methodically support processes via knowledge management. In this paper it is shown that this technique can also be successfully applied in the early stages to open up potential for optimization. Research for the paper is drawn from observing the processes of Porsche AG's modular kit development which are characterized by a need for coordination and documentation. Using the Activity Based Modeling Technique, these processes have been analyzed on basis of the system triple approach and the identified needs for action were implemented. Research results indicate: the newly implemented, through iterations improved and to more stakeholders expanded knowledge management system causes time savings in the process.*

**Keywords:** *Knowledge management, activity based modeling technique, modular kit development*

## 1 Introduction

Uncertainty and complexity are key factors influencing early stages of the product development process (PDP) [1, 2]. It is essential to adequately manage and apply knowledge during this dynamic and knowledge-based phase [3]. The IN<sup>2</sup>-project – “From INformation to INnovation” was initiated by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in order to foster systematic innovations in development processes by targeted interactions of knowledge, process and method management [4].

## **2 State of the Art**

### **2.1 The Early Stages of Product Development**

The quality of activities in the Fuzzy Front End is a crucial criterion for a project's success [5]. Up to 75% of a project's costs are defined during this phase [6]. Furthermore, the early stages entail a high level of uncertainty [1] and complexity [2]. In Pahl/Beitz, the development of a new product is subdivided into the variant, adjustment and new development of a product [7]. In practice, often it turns out that a product is built upon an existing one [8], facilitating cost reduction and an increased level of maturity on which to commence at the time the project starts. Concurrently, an objective in the product development is to delight the customer [9] with the aid of innovations, which induce a unique selling point and are therefore decisive for a company's success [10]. In order to solve this trade-off between cost efficiency and customer delight, product generation development – which describes a new product generation as a tailored subsystem-combination of new, adjusted and carried over components – can be used to support the development in the early stages [11]. Based on this, the modular kit development bears further cost-saving potential at group level where common-parts are shared across different products [12, 13].

### **2.2 Product Engineering Models**

To support the strong iterative character of the early stages, process models are required, which are able to map these iterations [14]. On the basis of systems theory, product development can be understood as a socio-technical system, based on the system triple of product engineering: system of objectives, system of objects and operation system (system triple approach) [15]. In this context, product engineering is described as the transformation of an initially vague system of objectives into a concrete system of objects [16]. Thus, the system of objectives contains a description of the relevant objectives including their links and interdependences, which are necessary to develop a final solution [17]. A final solution, as well as all intermediate results, is described in the system of objects. Within the operation system, both the system of objectives and the system of objects are created and further developed. The operation system establishes the sole connection between the two systems. [16]. The elements of the system of objects include all results explicated through activities carried out in the development process [18].

The advanced system triple approach builds on this concept. It takes into account the strong interactions between the system of objectives, operation system and system of objects and depicts the iterative nature [14]. The operation system is a product formed by the two subsystems as depicted in the figure below: state of knowledge and solution space. Knowledge required for development is illustrated in the state of knowledge. The solution space occurs on a mental level and contains all potentially feasible solutions. [19].

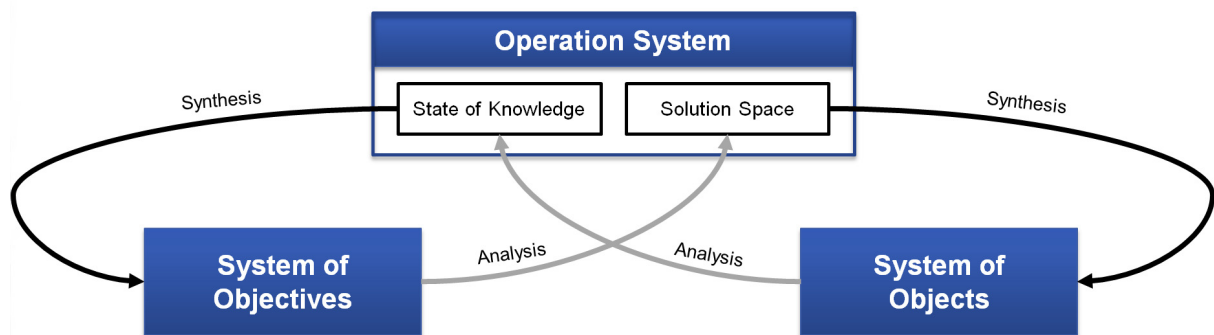


Figure 1: Advanced System Triple Approach [14]

Within the advanced system triple approach, the co-evolutionary and iterative process of the two parts analysis and synthesis is represented even more precisely [19]. Analysis and synthesis are seen here as the elementary activities of product development.

Through the approach of the integrated product engineering model (iPeM), the operation system can be specified by the activities of product engineering. The operation system contains the activities, methods and processes as well as the resources required for the realization (e.g. system designer, knowledge management systems) [16].

## 2.3 Knowledge Management

Knowledge management (KM) can be used to explicate the knowledge base accrued through iterations, making knowledge accessible for subsequent developments. In the literature the TOM-model of KM is widely used, considering three pillars: people, processes and technology [20]. More precisely, SCHÜTT specifies the three pillars as culture and organization, processes and IT support, and relates these to knowledge management systems (KMS) [21]. Since a company's competitiveness is related to its knowledge, which is in itself a resource, it is essential to support knowledge-intensive processes in the PDP through KM [22]. However, the elements of KM in current models of product development are deficient in structure [18]. Additionally, it is a challenge to take up and use previously

generated knowledge in downstream process steps [23]. Indeed, internal corporate processes can be designed to provide purposeful information in order to guide employees to increase efficiency [24]. To ensure a successful implementation of KM, it is necessary to connect unconnected knowledge bases by the transmission of knowledge objects [22]. Therefore, an activity based modeling technique on the basis of the iPeM has been developed within the IN<sup>2</sup>-project; it is intended to model the processes and the arising objects.

## 2.4 Activity Based Modeling Technique

The Activity Based Modeling Technique (ABMT) focuses on the stakeholders' activities. In this context, an activity is understood as transformation of one knowledge object into another. Knowledge objects contain explicit knowledge and can be archived in KMS independent from their knowledge holder [25].

Through the use of this modeling technique, interactions and iterations of the PDP can be depicted. The utilized methods and tools as well as the knowledge flows and transformations are illustrated through this technique (cf. Figure 2). [25]. Thus, the overall model provides information about the methods and KMS employed [25]. Connecting these elements within a process analysis results in a process map. A process map serves as the basis for the identification of actions needing to be undertaken (needs for action) in order to optimize the provision and back-up of generated knowledge - e.g. identification and remedy of knowledge sinks, missing documentation and use of different databases. [25]. This modeling technique has been validated in the context of the Formula Student Team KA-RaceIng [25] and applied at five IN<sup>2</sup>-partner companies [26].

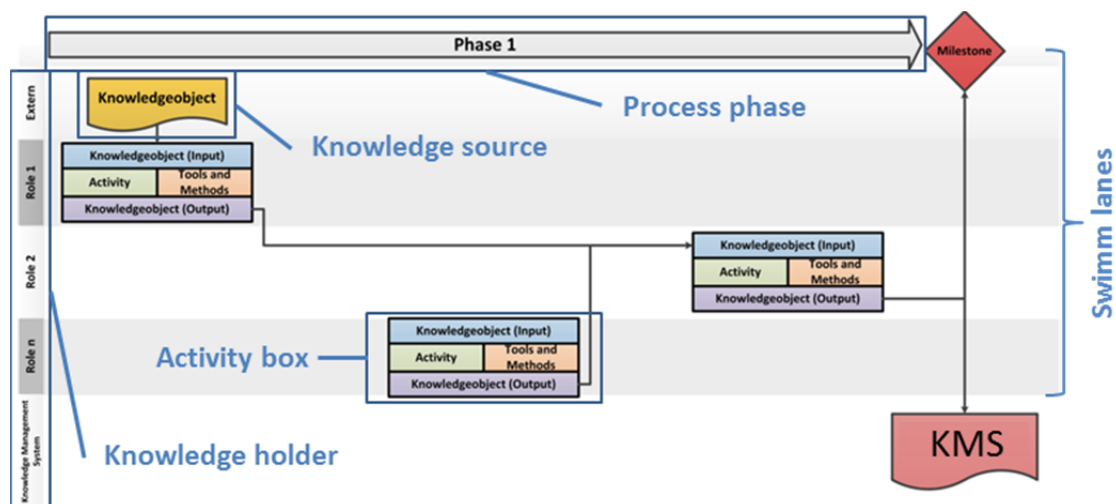


Figure 2: Elements of the Activity Based Modeling Technique [26]

### 3 Methodology

#### 3.1 Research Question

Taking into consideration the state of the art, it can be determined that the ABMT is a suitable method for the identification of needs for action in a project and for the deduction of recommendations on what actions should be taken. So far, the investigation was focused on the series processes of KA-RaceIng. Indeed, it remains unclear whether the modeling technique can be successfully applied in the iterative early stages of a company to deduct recommendations for actions to be taken, and whether potential for optimization can actually be achieved.

This paper aims to answer the following question:

*Is it possible to identify potential for optimization in the early stages through the application of the ABMT, and can this be opened up with the assistance of KMS?*

The research question is thus further sub-divided:

1. What potential for optimization can be derived in the early stages based on the ABMT?
2. How can the potential for optimization be implemented through the support of KM?
3. Can the potential for optimization actually be realized based on the implementation?

The testing environment of this study is the modular kit development of Porsche AG, an IN<sup>2</sup>-partner. This environment was chosen since there is a need for coordination and documentation within the scope of the management of change requests, and KM as well as methods and processes are of importance.

#### 3.2 Approach

In order to answer the sub-questions an analysis is performed, followed by the iterative development of a KMS. The development of the KMS is understood as a separate product development process. Hence, the advanced system triple approach can be applied, and forms the basis of the subsequent procedure as described in Figure 3.

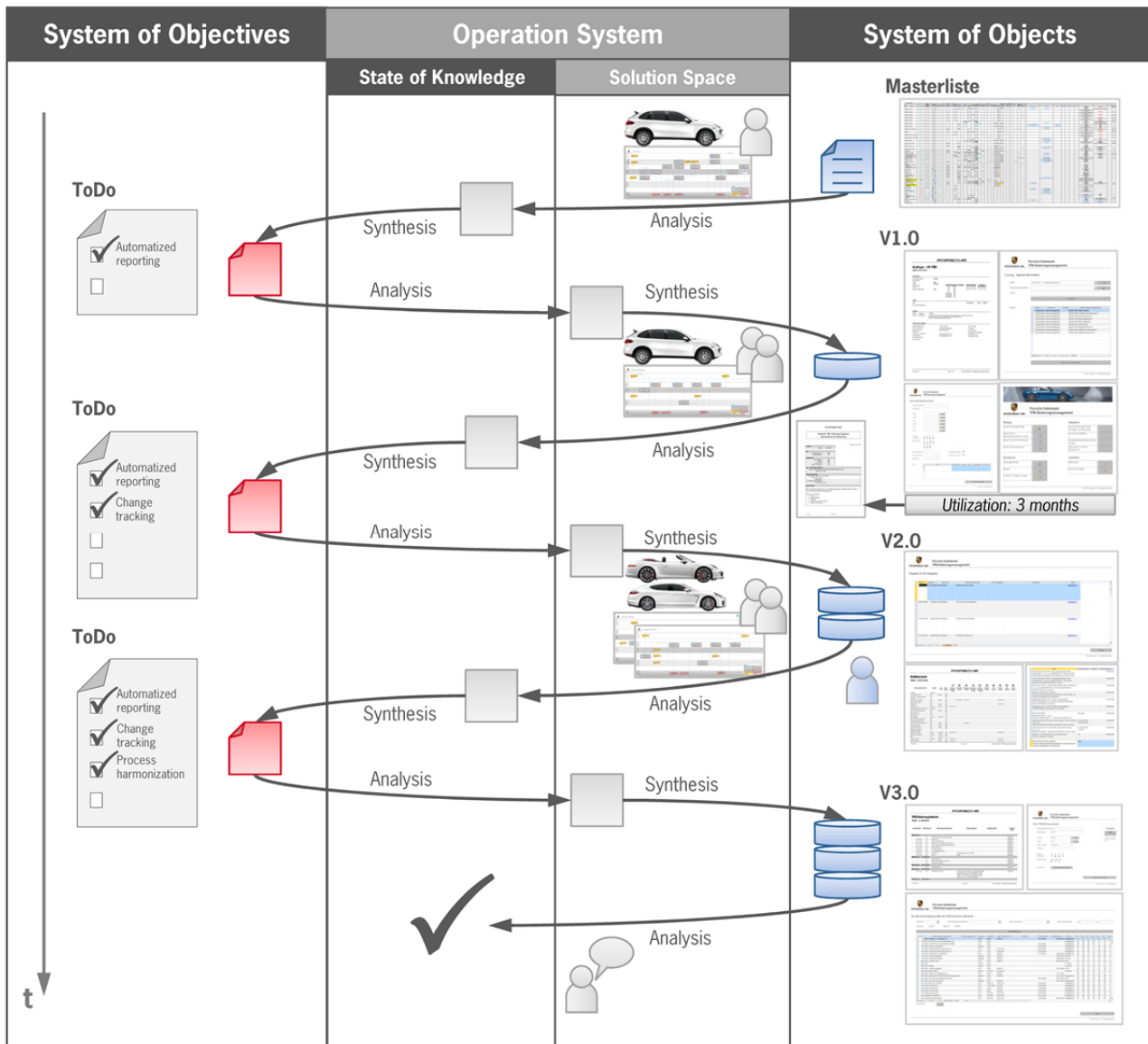


Figure 3: Methodology and structure of the paper

In a first step, the initial situation of the change request management of one modular kit has been analyzed using the ABMT (cf. 4.1). The resulting needs for action have been undertaken through the implementation of a database which supports the developers (cf. 4.2). A subsequent validation of the database V1.0 served the empirical acquisition of their experience with the system (cf. 4.3). Needs for action arising from a further iteration were transferred into the database V2.0 (cf. 4.4). Through the application of the ABMT on the processes of the two other modular kits, additional potential for optimization could be identified (cf. 4.5). This was achieved through the development of an overarching KMS V3.0 (cf. 4.6). The final system was validated based on end-user interviews (cf. 4.7).

## **4 Findings**

### **4.1 Analysis of the Initial Situation**

The process analysis confirms the extremely iterative character and need for coordination among the stakeholders of the integrated automotive group during alterations of vehicle concepts, as required due to the shared use of modular kits. Comparing the previous, local and list-based KMS solution “Masterliste” induces needs for action, since many manual activities need to be performed in order to collect and spread knowledge. The initial system of objectives aims at a central, IT supported KMS, which enables multi-user operations, adaptations to process changes and in particular supports users within the process.

### **4.2 Change Request Management System V1.0**

After conducting a concept workshop, the “Masterliste” is transferred into a relational database management system, taking into account the initial system of objectives. Thereby, the quality of the KM in the early stages of modular kit development shall be increased and the previous conventional data storage’s disadvantages be overcome. This is done by the creation of data consistency and data integrity on the one hand, and by input masks designed according to the analyzed activities of the real process on the other hand. The implementation of master data, failure check functionalities as well as an automatized reporting enables the structured support of the developers within the process.

### **4.3 Analysis of User Behavior**

Over a useful life of three months, it has been evaluated to what extent the needs for action have been implemented by the database and, if the network of committees can be depicted. The validation of the results points to considerable time savings in the process. Further potential for optimization, based on a repeated process analysis and written change requests, reside in adjustments concerning usability, functionality and process reliability, resulting partially from process changes caused by the use of the database itself.

### **4.4 Change Request Management System V2.0**

The database V2.0 is characterized by adjustments of attributes in the table structure, reports and input masks. A back-up function protects data, and a new “To-do” concept en-

sures a replicable connection to its related decision-making body. V2.0 is enhanced by the integration of a management view, allowing the categorization and filtering of alterations by their status and process progress. Thereby V2.0 is connected to the management process. In preparation for process changes, a generic committee structure is implemented.

#### 4.5 Analysis of the Processes of Additional Stakeholders

The expansion of the process analysis to the two other modular kits of Porsche AG reveals parallels with the examined processes. In order to exploit the potential for optimization and synergies at this point, the system of objectives strives for process harmonization. Additionally, there are needs for action in order to further develop the management functionality of the database and its interfacing with company-wide IT applications.

#### 4.6 Change Request Management System V3.0

Based on further workshops, the process is being harmonized, the requirements regarding the layout are being requested and new modules are being developed as well already existing ones of the V2.0 are being adapted and adjusted. Besides the interface adjustments to connect V3.0 with a central IT system to trace changes, the implementation of additional reports used for analytical purposes and the realization of file attachments as well as a user rights administration concept is being implemented in order to provide a real management-dashboard to evaluate the data. The V3.0 is illustrated in figure 4 below.



Figure 4: Application environment and automatized reporting of the database

#### 4.7 Validation

The database has been validated through a questionnaire and a semi-structured interview with the users of the new KMS. According to the users' statements, the database en-



hances transparency in the process and increases the structure of work packages due to its process orientation and functionality. Compared to the previous KMS “Masterliste”, this leads to time savings and a work simplification supporting the users during the process.

## 5 Conclusion and Outlook

While potential for optimization in the early stages of PDP is demonstrated in the case study of the paper, furthermore, the methodological support of the process has been improved by the implementation of a new KMS. In conclusion, the ABMT is suitable for the analysis and optimization of processes in the early stages.

In the future, the utilization of the new KMS’s concept in the Volkswagen Group should be assessed in order to support a broader range of stakeholders during change tracking, since there are close interconnections in place, based on the shared use of modular kits.

## Acknowledgments

This research and development project is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the Framework Concept “Research for Tomorrow’s Production” and managed by the Project Management Agency Karlsruhe (PTKA).

## References

- [1] Lindemann, Udo; Lorenz, Markus: Uncertainty Handling in Integrated Product Development. In: *10<sup>th</sup> International Design Conference*, Dubrovnik, 2008.
- [2] Lindemann, Udo; Maurer, Maik; Braun, Thomas: *Structural Complexity Management. An Approach for the Field of Product Design*. Berlin: Springer, 2009. – ISBN 978-3-540-87888-9
- [3] Earl, Chris; Johnson, Jeffrey; Eckert, Claudia; „Complexity“. *Design Process Improvement – A Review of Current Practice*. London: Springer Verlag, 2005. – ISBN 978-1-85233-701-8
- [4] Albers, Albert; Reiß, Nicolas; Bursac, Nikola; Urbanec, Jan; Lüdcke, Robert: Situation-appropriate method selection in product development process – empirical study of method application. In: *NordDesign*, Espoo, 2014.
- [5] Cooper, Robert; Kleinschmidt, Elko: Screening new products for potential winners. In: *Long Range Planning*, Vol. 26, No. 6, pp.74-81. London: Pergamon Press Ltd, 1993.
- [6] Herstatt, Cornelius; Verworn, Birgit: *Management der frühen Innovationsphasen*. 2nd ed. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2007. – ISBN 978-3-8349-0375-4
- [7] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Aufl. Berlin: Springer, 2013.

- [8] Lindemann, Udo; Maurer, Maik: Entwicklung und Strukturplanung individualisierter Produkte. In: *Individualisierte Produkte*, pp. 41–62. Berlin: Springer, 2006. – ISBN 978-3-540-25506-2
- [9] Kano, Noriaki; Nobuhiko Seraku; Fumio Takahashi; Shinichi Tsuji: Attractive quality and must-be quality. In: *Journal of the Japanese Society for Quality Control*, Vol. 14., No. 2, pp. 147-156, 1984.
- [10] Schumpeter, Joseph: *Theorie der Wirtschaftlichen Entwicklung*. Berlin: Duncker & Humblot, 1912.
- [11] Albers, Albert; Bursac, Nikola; Urbanec, Jan; Lüdcke, Robert; Rachenkova, Galina: Knowledge Management in Product Generation Development. In: *Beiträge zum 25. DfX-Symposium*, 2014.
- [12] Ehrlenspiel, Klaus; Kiewert, Alfons; Lindemann, Udo: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren; Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 6. Aufl. Heidelberg: Springer, 2007.
- [13] Hackenberg, Ulrich: Innovative Vehicle Architecture for Future Demands. In: *VDI-FVT-Jahrbuch*, pp.32-39, 2009. - ISSN 2195-1454
- [14] Lohmeyer, Quentin: Human-centered modeling of product development systems in consideration of the synthesis and analysis of dynamic systems of objectives. In: *IPEK–Forschungsberichte* 59, 2013.
- [15] Ropohl, Günter: *Eine Systemtheorie der Technik - Zur Grundlegung der allgemeinen Technologie*. München: Carl Hanser Verlag, 1979. - ISBN 978-3446128019
- [16] Albers, Albert: Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In: *Proceedings of the TMCE*, Ancona, 2010.
- [17] Negele, Herbert: *Systemtechnische Methodik zur ganzheitlichen Modellierung am Beispiel der integrierten Produktentwicklung*. München: Utz Verlag, 2006. – ISBN 3-8316-0384-7
- [18] Meboldt, Mirko; Mental and formal modelling, a contribution to the integrated product development model (iPeM). In: *IPEK – Forschungsberichte* 29, 2008. – ISSN 1615-8113
- [19] Albers, Albert; Ebel, Björn; Lohmeyer, Quentin: System of Objectives in Complex Product Development. In: *Proceedings of TMCE*, Karlsruhe, 2012.
- [20] Wolf, Thorsten; Decker, Stefan; Abecker, Andreas: Unterstützung des Wissensmanagements durch Informations- und Kommunikationstechnologie. In: *Electronic Business Engineering. 4. Internationale Tagung Wirtschaftsinformatik*. Heidelberg: Physica Verlag, 1999. – ISBN 978-3-790-81196-4
- [21] Schütt, Peter: *Wissensmanagement*. Niedernhausen: Falken/Gabler Verlag, 2000.
- [22] Probst, Gilbert; Raub, Steffen; Romhardt, Kai: *Wissen managen. Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen*. Berlin: Gabler Verlag, 2012. – ISBN 978-3-8349-4562-4
- [23] Albers, Albert; Muschik, Sabine; Ebel, Björn: Einflüsse auf Entscheidungsprozesse in frühen Aktivitäten der Produktentstehung. In: *6. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung*, 2010.
- [24] Lüdcke, Robert: Effizienzverbesserung durch gezielte Führung in der Produktentwicklungspraxis. In: *Fortschritt-Berichte VDI*, Reihe 1, Nr. 367. Düsseldorf: VDI Verlag, 2003. - ISBN – 3-18-336701-7
- [25] Albers, Albert; Reiß, Nicolas; Bursac, Nikola; Schwarz, L. and Lüdcke, Robert: Modelling Technique for Knowledge Management, Process Management and Method application - A Formula Student exploratory. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on MMEP*, pp.147-158, 2013.
- [26] Albers, Albert; Lüdcke, Robert; Bursac, Nikola; Reiß, Nicolas: Connecting Knowledge-Management-Systems to Improve a Continuous Flow of Knowledge in Engineering Design Processes. In: *Proceedings of TMCE*, pp. 393-402, Budapest, 2014.

# Einführung eines ERP-Systems – ein Praxisbericht

Michael Altgott, Wolfgang Sticht

ebu Umformtechnik GmbH

Rathenaustraße 47, 95444 Bayreuth

E-Mail: michael.altgott@ebu-umformtechnik.de; Internet: <http://www.ebu-umformtechnik.de>

**Inhalt:** Die Einführung eines modernen ERP-Systems bedeutet für KMU erhebliche Aufwendungen in Bezug sowohl auf Investitions- als auch Ressourcenkapazitäten. Die Auseinandersetzung mit bestehenden Prozessabläufen und die Abbildung im einzuführenden ERP-System bilden dabei die zentralen Punkte der Umsetzung. Der Praxisbericht geht auf Detailkonzepte und -lösungen ein.

**Abstract:** The initiation of an ERP-System means extensive charges for SMEs related to capital investments and capabilities. The discussion about existing processes and the transformation to the new ERP-System constitute the essence of the implementation. This report shows detailed concepts and solutions.

**Stichwörter:** ERP-System, PDM-ERP-Schnittstelle, PDM-ERP-Kopplung, Prozessabläufe

**Keywords:** ERP-System, PDM-ERP-Interface, PDM-ERP-Interlinking, workflow

## 1 Einleitung

Der Umstieg auf ein modernes ERP-System bedeutet gerade für KMU teilweise gravierende Umstellungen in den Prozessabläufen bzw. eine grundsätzliche Auseinandersetzung mit den bestehenden Abläufen und deren Umsetzung im neuen System. Dabei ist in jedem (!) Punkt abzuwägen, ob der Prozessablauf auf die Gegebenheiten des ERP-Systems umgestellt wird oder das ERP-System an die speziellen Bedürfnisse des Unternehmens teilweise kostenpflichtig angepasst werden muss. Die dafür erforderlichen Ressourcen bringen ein KMU bei normalen Projektdurchlauf bzw. bereits bei normaler Auftragslage auch an die Kapazitätsgrenzen. [1]

Nicht nur die lange Laufzeit der ERP-Einführung, sondern auch die besonderen Umstände sollen in diesem Praxisbericht beleuchtet und am Beispiel der ebenfalls neu eingeführten PDM-ERP-Kopplung konkretisiert werden.

## 2 Ausgangslage

Der Entschluss zur Einführung eines modernen ERP-Systems wurde bereits 2008 von der damaligen Burkhard GmbH gefasst. Zu dieser Zeit bestand die Unternehmung aus

den drei Geschäftsfeldern Gießerei, Steinbearbeitungsmaschinen sowie Maschinen und Anlagen zur Umformtechnik. In Zusammenarbeit mit dem FIR der RWTH-Aachen wurde unter mehr als 140 relevanten Anbietern das für das Unternehmen am geeignetsten System ausgewählt. Die Wahl fiel auf das ERP-System PSIpenta der PSIPENTA Software Systems GmbH. Bis zum damals geplanten Go-Live-Termin im Herbst 2011 lief die Einführung auf Hochtouren. Eine dann im Januar 2012 durchgeführte Aufspaltung des Unternehmens in die drei Produktbereiche führte zu einem abrupten, zwischenzeitlichen Ende der ERP-Einführung.

Nach Prüfung aller Ausgangsbedingungen für das neue Unternehmen gab es zu Beginn des Jahres 2014 den erneuten Startschuss zur ERP-Einführung für die ebu Umformtechnik GmbH mit einem geplanten Go-Live-Termin am 6. Oktober 2014.

Aufgrund der Fülle an Informationen, Regelungen, neuen Konzepten etc. im Zuge der ERP-Einführung können im Folgenden nur Details im Rahmen des Konferenzthemas beleuchtet werden.

### **3 Entwicklung einer PDM-ERP-Schnittstelle**

Besonderes Verbesserungspotential der Prozessabläufe im Zuge dieser ERP-Einführung liegt im Bereich der mechanischen Konstruktion bei der Einbindung einer PDM-ERP-Kopplung sowie der Anbindung der elektrischen Konstruktion an diese Schnittstelle, um auch eine Kopplung zwischen dem Elektro-CAD- und dem ERP-System zu generieren.

Die Vorteile einer PDM-ERP-Kopplung liegen in der direkten, bidirektionalen Übertragung der vorliegenden Artikelinformationen und –parameterwerte. Dadurch werden sowohl die erneute manuelle Eingabe von Artikelgrunddaten, die vorher sowohl im PDM- als auch im noch vorhandenen PPS-System manuell eingegeben werden mussten, als auch die mögliche Fehleingabe vermieden.

Zusätzlich werden durch die PDM-ERP-Schnittstelle komplette, einstufige Stücklisten vom PDM- an das ERP-System übergeben.

#### **3.1 Mechanische Konstruktion**

Die mechanische Konstruktion der ebu Umformtechnik GmbH arbeitet mit dem CAD-Programm SolidWorks von Dassault Systems und dem PDM-System MaxxDB der Solid-

pro GmbH. Die für das Unternehmen erforderliche PDM-ERP-Kopplung wird gemeinsam mit den Projektpartnern Solidpro und PSIPENTA auf Basis einer bereits bestehenden Schnittstelle weiterentwickelt und an die speziellen Bedürfnisse angepasst.

Dazu gehört als Basis eine Zuordnungstabelle, die die Parameterwerte der PDM-Datenbankfelder den entsprechenden ERP-Datenbankfeldern zuweist.

Tabelle 1: Ausschnitt/Beispiele Mapping Parameter Schnittstellenaufruf

| Objekt | PSIpenta   | Format | MaxxDB                           |
|--------|--|--------|----------------------------------|
| PART   | AENDIND  | A(2)   | Version (VERSION)                |
| PART   | angehängtes Dokument vom TYP 114 (Änderungshinweise) |        | CHANGE_TEXT, CHANGE_NOTE         |
| PART   | angehängtes Dokument vom TYP 115 (Zeichnung-PDF/A)   |        | Link auf Neutralformat PDF/A     |
| PSTK   | PSTK_PRI_KEY   | A(20)  | P_IDENT                          |
| PSTP   | BREITE   | N(7,3) | Rohmaß (RAW)                     |
| PSTP   | KOMPONENTEN_ART_NR                                   | A(20)  | Rohteilnummer (C_IDENT / FIELD4) |
| PSTP   | KOMPONENTEN_MENGE                                    | N(7,3) | COUNT                            |
| PSTP   | LAENGE_MASS  | N(7,3) | Rohmaß (RAW)                     |
| PSTP   | POSITIONS_NR   | N(4)   | POSNR                            |
| PSTP   | ZEICHNUNGS_POS_NR                                    | N(4)   | POSNR                            |
| PSTP   | MENGENBASIS  |        | MENGENBASIS                      |

Dabei sind auch logische Funktionen implementiert, die zum Beispiel das kombinierte Rohmaß in der MaxxDB je nach ausgewähltem Format in die entsprechenden Längen-, Breiten-, Höhen- oder Durchmesserangaben zerlegen. Auch sind Kombinationen von mehreren MaxxDB-Feldern in ein PSIpenta-Feld oder in ein angehängtes Dokument möglich.

Da die im PDM-System vorliegenden Informationen nicht ausreichen, um die Artikelstammdaten soweit zu füllen, dass damit im ERP-System gearbeitet werden kann, müssten diese Parameterwerte wieder manuell beim Anlegen im ERP-System nachgetragen werden. Um auch diese manuelle Eingabe zu umgehen, wird im PDM-System ein dem 3D-Volumenmodell entsprechender Vorlagenartikel ausgewählt. Dieses dafür in der MaxxDB angelegte Feld dient dazu, bei der Kopplung auf PSIpenta-Seite ein mit entsprechenden Feldwerten vorgefüllter Vorlagenartikel als Basissatz für die Artikelstammdaten

mit den zusätzlichen Informationen der MaxxDB zu verschmelzen und als neuen Artikel abzuspeichern.

Die Ausführung der PDM-ERP-Kopplung, also die Ausführung der Schnittstelle wird entweder automatisch gestartet, wenn ein Artikel freigegeben wird, oder manuell durch den Konstrukteur angestoßen, wenn dieser schon vorab den Artikel im ERP-System anlegen möchte.

### **3.2 Elektrische Konstruktion**

Die elektrische Konstruktion der ebu Umformtechnik GmbH arbeitet mit den CAD-Programmen EPLAN von EPLAN Software & Service GmbH & Co. KG bzw. ELCAD der AUCOTEC AG. Hier kommen ausschließlich Kaufteile zum Einsatz, die bereits im ERP-System angelegt sind bzw. bei Bedarf von der Normstelle und dem Einkauf im ERP-System angelegt werden. Aus diesem Grund werden nur Stücklisten von den CAD-Systemen der elektrischen Konstruktion an das ERP-System übergeben.

Damit keine zusätzliche Schnittstelle erforderlich ist, kann die Funktionalität der PDM-ERP-Schnittstelle MaxxDB-PSIpenta genutzt werden. Der im ERP-System neu zu generierende Stücklistenkopf bzw. Artikelstamm wird aus dem Dateinamen der Excel-Datei, die die Stückliste von den o.g. CAD-Systemen enthält, und einem entsprechenden Vorlagenartikel gebildet. Der Dateiname der Excel-Datei besteht aus der Artikelnummer der Elektrostückliste. Damit ist auch hier eine manuelle Eingabe auf Seiten der ERP-Systems beim Übertragen einer Elektrostückliste nicht erforderlich.

### **3.3 Umsetzung**

Die Datenbank des ERP-Systems wird durch Datenmigration aus dem bisherigen PPS-System gefüllt. Bei der Freigabe eines Artikels oder durch manuellen Anstoß wird die Schnittstelle gestartet. Ist der Artikel im ERP-System nicht vorhanden, wird der Artikelstamm angelegt, andernfalls werden die Parameterwerte zwischen den beiden Systemen abgeglichen. Ist ein Artikel synchronisiert, so liegt die Datenhoheit der entsprechenden Felder beim PDM-System.

Ist der Artikel eine Baugruppe, so wird zusätzlich die Stückliste übergeben. Dazu findet eine Synchronisation der Stücklisten zwischen PDM- und ERP-System statt:

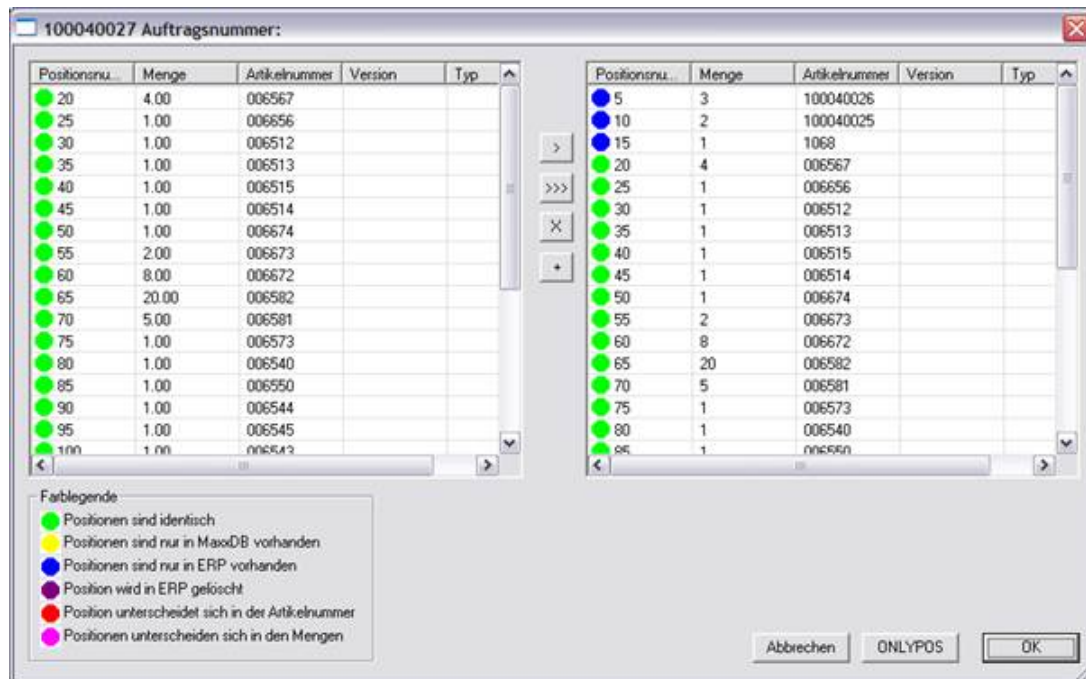


Abbildung 1: Synchronisation der PDM- mit der ERP-Stückliste

Auf der linken Seite ist die Stückliste der MaxxDB und auf der rechten Seite die Stückliste desselben Artikels in PSIpenta dargestellt. Mittels Farbkennzeichnung sind die Unterschiede beider Stücklisten einfach zu erkennen und können mit geringem Arbeitsaufwand intuitiv bearbeitet werden.

## 4 Neues Farbkonzept

Die Entscheidung, auf ein modernes ERP-System umzustellen, hatte auch die Implementierung eines neuen Farbkonzeptes zur Folge.

Bislang wurde für jede Farbe eine neue Artikelnummer angelegt, was zu einem erheblichen Aufwand bei einer neuen Farbe bzw. einem neuen Kundenfarbwunsch führte. Das pflegen dieser Artikel, gerade bei technischen Änderungen, war mit einem immensen Aufwand und mit großem Fehlerpotential verbunden.

Das neue Farbkonzept sieht eine indirekte Farbgebung eines Artikels vor, indem einem Artikel eine von insgesamt vier Farbkategorien zugewiesen wird. Die vier Farbkategorien lauten:

#### **4.1 Hauptfarbe**

Die Hauptfarbe ist die Farbe für die überwiegenden Elemente im sichtbaren und verdeckten Bereich. Sie bestimmt den Gesamteindruck des Produktes bzw. der gesamten Linie.

#### **4.2 Nebenfarbe**

Die Nebenfarbe stehe für Technologie an strategisch günstigen Stelle der Maschine. Sie tritt gemeinsam mit der Hauptfarbe als sich ergänzendes und unverwechselbares Duo auf.

#### **4.3 Kontrastfarbe**

Die Kontrastfarbe wird in Bereichen von besonderer Bedeutung eingesetzt, um auf bestimmte Bauteil sowie Funktionen (z.B. Bewegungen) hinzuweisen. Sie unterstreicht durch ihren Kontrast zu Haupt- und Nebenfarbe ihre signalisierende Wirkung.

#### **4.4 Sonderfarbe**

Sonderfarben werden für Bauteile, für die eine hervorgehobene Farbgebung erforderlich ist, verwendet. Die Sonderfarbe wird dem entsprechenden Bauteil direkt und fest zugeordnet.

Während die ersten drei (RAL-) Farben im Auftragsfall vom Kunden festgelegt werden, wird die Sonderfarbe ausschließlich von der Konstruktion festgelegt.

Somit wird in den Artikelstammdaten lediglich die Farbkategorie festgelegt und bei der Auflösung des Artikels in einer Auftragsstückliste die reale RAL-Farbe diesem Artikel zugewiesen.

Dieses Farbkonzept wurde aufgrund der zu erwartenden Vorteile bereits vor der Einführung des ERP-Systems umgesetzt. Die Praxis zeigt, dass die damit erzielte Farbvariantenvielfalt für die Kunden völlig ausreichend ist und bislang keine (!) Ausnahme davon gemacht werden musste. Die Abwicklung der Farbwünsche hat sich dadurch erheblich vereinfacht, falsche Lackierungen aufgrund von Stücklistenfehlern oder manuellen Eingabefehlern gehören der Vergangenheit an. Ebenso ist der erforderliche Pflegeaufwand auf ein Bruchteil der sonst üblichen erforderlichen Zeiten geschrumpft.



## 5 EDI / myOpenFactory

Neben den innerbetrieblichen Schnittstellen zum ERP-System soll hier auch die Schnittstelle zu externen Datenbanken zum Beispiel von Lieferanten betrachtet werden. Mit der myOpenFactory-Plattform der myOpenFactory Software GmbH können Unternehmen auf elektronischem Wege direkt mit einer Schnittstelle vom eingesetzten ERP-System mit den meisten ihrer Geschäftspartner kommunizieren [2]. Damit ist eine elektronische Auftragsabwicklung und –kontrolle möglich, mit der auch Informationen zwischen den eingesetzten ERP-Systemen ausgetauscht werden, ohne dass eine erneute manuelle Eingabe erforderlich ist. [3]



Abbildung 2: Grundprinzip der elektronischen Auftragsabwicklung mit myOpenFactory

Durch die durchgängige Prozessunterstützung vom Stammdatenabgleich bis zur Rechnung und/oder Lastschrift entfällt die manuelle Erfassung der elektronisch übertragenen Auftragsdaten, wodurch eine erhebliche Einsparung erzielt wird. Die Auftragsbestätigungen werden elektronisch übertragen und automatisch eingetragen. Mit dem Lieferavis stehen sämtliche Wareneingangsdaten zur Verfügung. Das „Zusammensuchen“ der Bestellpositionen bei Wareneingangserfassung einer Sammellieferung entfällt völlig.

Der elektronische Datenaustausch erfordert nicht nur wesentlich präzisere Daten, sondern liefert diese auch bei minimalen Aufwand. So deckt der Stammdatenabgleich Dubletten auf, die Datenübernahme aus den Webshops der Lieferanten spart auf der einen Seite viel Arbeit und führt auf der anderen Seite zusätzlich zu wesentlich präziseren sowie aktuellen Artikeldaten.

Mit dem Lieferavis und der Rechnung werden weitere Daten (z.B. das Ursprungsland, Gewicht, fremdsprachige Artikelbezeichnung, Exportkennzeichen) automatisch zur Verfügung gestellt. Diese Daten sind gerade für eine rationelle Abwicklung z.B. von Ersatzteillieferungen ins Ausland unverzichtbar.

## **6 Zusammenfassung und Ausblick**

Die Einführung eines modernen ERP-Systems ist gerade für KMU ein sehr komplexes und ressourcenbindendes Projekt. Sowohl die internen Prozesse als auch das ERP-System selbst müssen aufeinander adaptiert werden. Zusätzlich können Verbesserungspotentiale in den Prozessabläufen umgesetzt werden, wenn die vorhandenen EDV-Systeme an das neue ERP-System gekoppelt werden, um einen durchgängigen Datenfluss ohne erneute manuelle Eingabe vorhandener EDV-Daten zu gewährleisten.

Die ebu Umformtechnik GmbH in Bayreuth startet am 6. Oktober 2014 mit dem „Go-Live“-Termin die Produktivphase des ERP-Systems und nutzt von diesem Zeitpunkt die Vorteile eines weitest gehenden Datenflusses zwischen den EDV-Systemen.

Es bleibt spannend...

## **Literatur**

- [1] Hesseler, Martin; Görtz, Marcus: *Basiswissen ERP-Systeme – Auswahl, Einführung & Einsatz betriebswirtschaftlicher Standardsoftware*. 1. Aufl. Witten - Herdecke: W3I, 2007. – ISBN 978-3-937137-38-4
- [2] Schuh, Günther: *Effiziente Auftragsabwicklung mit myOpenFactory*. Hanser Fachbuchverlag, 2007. – ISBN 978-3-3446412-78-1
- [3] Schuh, Günther; Stich, Volker: *WInD – Wandlungsfähige Produktionssysteme durch integrierte IT-Strukturen und dezentrale Produktionsplanung und -regelung*. FIR-Edition Forschung Band 11. – ISBN 978-3-943024-13-5 – (BMBF-Förderkennzeichen: 02PR2160)

# Eine Methode für eine Prüf- und Validierungsumgebung zur Komponentenuntersuchung handgehaltener Geräte in der Produktentwicklung

**Sven Matthiesen, Thomas Gwosch, Sebastian Mangold**

IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kaiserstraße 10, 76131 Karlsruhe

E-Mail: [thomas.gwosch@kit.edu](mailto:thomas.gwosch@kit.edu); Internet: <http://www.ipek.kit.edu>

**Inhalt:** Eine Reduzierung der Entwicklungszeit bietet den Herstellern bei der Produktentwicklung von Elektrowerkzeugen die Chance auf einen früheren Markteintritt. Hierfür müssen Unsicherheiten in Bezug auf Funktion und Lebensdauer der Geräte reduziert werden, um das Investitionsrisiko zu senken. Insbesondere ist die Validierung der Prototypen in den einzelnen Entwicklungsschritten einer jeden Generation durch Versuche bis Lebensdauerende aufgrund des hohen Personaleinsatzes kostenintensiv. Ebenso stellt die Beeinflussung der Handtests durch die Heterogenität der Anwender eine Herausforderung dar. Ein effizienter Ansatz zur Begegnung dieser Herausforderungen kann die Validierung durch ein virtuelles Modell, kombiniert mit Validierung an Prüfständen liefern. In diesem Beitrag wird ein Konzept für eine Entwicklungs- und Validierungsumgebung für Teilsysteme handgehaltener Geräte vorgestellt. Ziel dieser Umgebung ist eine möglichst realitätsidentische Prüfung von Teilkomponenten in einer frühen Phase der Produktentwicklung in der sich andere Teilsysteme, bspw. das umgebende Gehäuse, noch in früheren Entwicklungsphasen befinden. Die Validierungsumgebung wird am Beispielsystem Winkelschleifer diskutiert.

**Abstract:** Reducing the development time of products allows power tool manufacturer to launch their products earlier into the market. To reduce the investment risks, the proof of functions and life expectancy are inevitable steps within the product development process. Especially the prototype validation of every development generation costs, due to high human resources for hand tests, a lot of money. An additional challenge is the heterogeneity of the users in these experimental procedures. To handle this challenge test rigs containing virtual and physical modelling can extend validation activities. This paper presents a method using a product engineering and validation platform for testing subsystems of power tools. The aim of this platform is a test environment to simulate realistically conditions at early stages of product engineering. In these stages some subsystems like the housing are not developed yet, but required for validation activities of other parts such as the transmission. In this article an innovative validation platform is introduced using an angular grinder as an example.

**Stichwörter:** Entwicklungs- und Validierungsumgebung handgehaltener Geräte; Teilsystementwicklungsprüfstand; Komponentenentwicklung; Validierungsmethoden

**Keywords:** product engineering and validation platform for power tool testing; test rig for subsystem research; component development; validation methods

## 1 Motivation und Zielsetzung

Bei der Produktentwicklung von handgehaltenen Geräten sind Anwender und Anwendung für die Funktion des Produkts relevant [1]. Für die Sicherstellung der Produktfunktionen ist deshalb die ganzheitliche Betrachtung der Systeme Anwender, Gerät und Anwendung notwendig. Ein kontinuierlicher Abgleich zwischen den geforderten und den erreichten Produktfunktionen – die Validierung – ist die zentrale Aktivität der Produktentwicklung. In der Gerätebranche basiert die Erprobung von Geräten und deren Teilsystemen in den Validierungsaktivitäten der Produktentwicklung vorwiegend auf Prüfszenarien, die auf Basis von Erfahrungswissen der Hersteller definiert sind. Um den Anwender und die Anwendung, die die Gerätefunktion stark beeinflussen, in die Erprobung einzubeziehen, werden personengebundene Handtests durchgeführt. Es entstehen durch unterschiedliches Anwenderverhalten zusätzliche Unsicherheiten in den Prüfergebnissen. Außerdem sind diese Handtests nur möglich, wenn das komplette Gerät vorliegt, d.h. alle Komponenten müssen mindestens als physischer Prototyp vorliegen. Es kann also erst sehr spät in der Entwicklung auf die Ergebnisse der personengebundenen Erprobungen reagiert werden, was bei großem Änderungsaufwand hohe Kosten nach sich zieht. Besonders bei großen Investitionsentscheidungen, bspw. für die Fertigung der Gehäusespritzgussformen, führt die späte Erprobung des Gesamtgeräts zu einem hohen Investitionsrisiko. Eine Maßnahme zur Kostenreduzierung und zur Reduzierung der Unsicherheiten durch den Anwender in der Validierung sind Untersuchungen von Teilsystemen wie beispielsweise dem Antriebsstrang durch Komponententests mit Hilfe von Bremsenprüfständen. Es werden Mindestbetriebszeiten durch Erfahrungswerte bestimmt, die zu keinem Ausfall des Geräts führen dürfen. Eine Optimierung von einzelnen Komponenten des Systems hinsichtlich der Lebensdauer oder Kosten ist damit kaum möglich. Die Mindestbetriebszeit lässt keine Aussage für einzelne Komponenten sondern immer nur für das Gesamtsystem zu. Ebenfalls ist die stark reduzierte Abbildung der Anwender- und Anwendungseinflüsse bei Komponententests problematisch. Neben diesen Aspekten ist es in der Produktentwicklung von Geräten im Gegensatz zu Prüfszenarien der Automobilindustrie aktuell noch nicht möglich, einzelne Phänomene wie beispielsweise Schwingungseinflüsse auf Komponenten und den Einfluss von Wechselwirkungen verschiedener Teilsysteme isoliert zu untersuchen.

In diesem Beitrag wird eine Systematik zur Untersuchung relevanter Systemgrößen von Geräten vorgestellt, die es ermöglicht, Phänomene wie beispielsweise das Verschleißverhalten im Gerät zu untersuchen und in einer physischen Prüfumgebung in den frühen Phasen der Produktentwicklung, in denen noch nicht alle Komponenten für Gesamtgeräteerprobungen vorliegen, abzubilden. Der Fokus liegt hierbei auf der Abbildung des Gehäuseeinflusses und Rückschluss auf die Kräfte des Anwenders und der Anwendung.

## 2 Stand der Forschung

Eine Prüfumgebung erlaubt die Untersuchung von Geräten und deren Komponenten unter definierten Randbedingungen. Bei handgehaltenen Geräten ist es notwendig, dass Anwender, Gerät und Anwendung als gesamtheitliches System in der Prüfumgebung abgebildet sind. Durch die Heterogenität des Anwenders und der Anwendung müssen deren Einflüsse für eine reproduzierbare Untersuchung durch Modelle abgebildet werden. Gleiches gilt für Systemkomponenten, welche zum Zeitpunkt der Validierungsaktivität noch nicht verfügbar sind (bspw. das Gerätegehäuse).

Ein wichtiger Aspekt bei der Prüfung von Geräten ist die Vibrationsuntersuchung am vollständigen Gerät, um Vibrationsemissionen prüfen und beurteilen zu können. Ziel war und ist es hierbei die Schwingungseigenschaften des Anwenders in einem Prüfstand abzubilden, um eine reproduzierbare Messung der Schwingungsemission zu ermöglichen. Solche Prüfstände wurden beispielsweise von Cronjäger et. al. [2], Hansson und Kihlberg [3], Marcotte et. al. [4] sowie Schenk [5] vorgestellt. Leistungs- und Lebensdauerprüfstände, welche eine zur Realität wirkungsäquivalente Einbindung des Geräts durch die Abbildung der anwenderseitigen Wechselwirkung ermöglichen sind selten. Die anwendungsseitigen Wechselwirkungen sind bislang nur in einfachen Bremsprüfständen oder durch physische Ersatzanwendungen auf das vollständige Gerät abbildbar. Die zu Handtests wirkungsäquivalente Prüfung von Teilsystemen in einer frühen Entwicklungsphase ist nach dem bisherigen Stand der Technik nicht möglich.

Einen vielversprechenden Ansatz zur Validierung von Teilkomponenten in Geräten bietet der aus der Automobilentwicklung stammende X-in-the-Loop-Ansatz [6]. Mithilfe dieses Ansatzes, welcher die durchgängige Berücksichtigung der interagierenden Subsysteme fordert, können Entwicklungs- und Validierungsprüfstände erstellt werden, die auf

verschiedenste Teilsysteme übertragen werden können. Ein wesentlicher Kern des XiL-Ansatzes ist die mögliche Wiederverwendbarkeit der gewonnenen Lastzyklen für die Teilkomponentenprüfung späterer Produktgenerationen. Ein Transfer dieses Ansatzes auf das Gebiet der handgehaltenen Geräte bei kontinuierlicher Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit dem Anwender und der Anwendung wird in [7] beschrieben. Besonderes Augenmerk wird auf die Abbildung der Teilsysteme Anwender, Gerät und Anwendung als physisches sowie virtuelles Modell gelegt. Das Gerät kann auf verschiedenen Detaillierungsstufen modelliert werden. So können durch die Anpassung der Systemgrenze und die dazugehörigen Schnittstellengrößen einzelne Teilsysteme isoliert untersucht werden. Teilsysteme, die nicht durch das Originalsystem abgebildet werden können, müssen durch geeignete Modelle beschrieben werden.

### **3 Methode**

#### **3.1 Systemzustand im Gerät erfassen**

Bei der Analyse von Effekten technischer Systeme, die in einer Prüfumgebung reproduzierbar nachgebildet und untersucht werden sollen, muss der Systemzustand in der realen Anwendung messtechnisch erfasst werden. Dazu ist neben der Auswahl geeigneter Anwendungsfälle auch die Wahl der zu analysierenden Messgrößen von entscheidender Bedeutung. Im Allgemeinen können die zu erfassenden Systemgrößen in Fluss- und Potentialgrößen klassiert werden. Beispiele für Flussgrößen sind Kräfte, Drehmomente und elektrische Ströme, Potentialgrößen sind beispielsweise Drehzahlen, Verschiebungen und elektrische Spannungen. Flussgrößen sind entlang des Kraftflusses konstant, während sich Potentialgrößen kontinuierlich ändern. Das hat zur Folge, dass die Auswahl der Messstelle bei Potentialgrößen einen größeren Einfluss auf die Unsicherheit der Messgrößen hat als dies bei Flussgrößen der Fall ist. Bei Flussgrößen können sich nur Messunsicherheiten ergeben, wenn Energiespeicher entlang des Kraftflusses vorhanden sind. Eine weitere Eigenschaft von Flussgrößen in Bezug auf die messtechnische Erfassung ergibt sich aus der Anordnung des Sensors, der in den Kraftfluss integriert werden muss. Diese Eigenschaft ist bei Potentialgrößen nicht vorhanden, wodurch die mechanischen Eigenschaften des Sensors einen geringeren Einfluss auf die Systemgrößen haben.

Bei der Geräteuntersuchung sind speziell die Kräfte zwischen Anwender und Gerät sowie Anwendung und Gerät wichtige Kenngrößen. Die messtechnische Erfassung dieser

Kräfte, also der Flussgrößen, gestaltet sich bei handgehaltenen Geräten schwierig, da, wie oben dargestellt, ein Messelement in den Kraftfluss zwischen Anwender und Gerät sowie Untergrund und Gerät (bspw. zwischen Bohrer und Wand) eingebracht werden muss. Hierbei ist sicherzustellen, dass die Integration des Sensors in den Kraftfluss das Systemverhalten nicht grundlegend verändert. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Steifigkeit des Sensors oder dessen Anbindung im Vergleich zur Systemsteifigkeit sehr gering ist. Zusätzlich ergeben sich bei handgehaltenen Geräten aufgrund der Kompaktheit und hoch integrierten Bauweise große Restriktionen bei dem verfügbaren Platzangebot für die Sensoreinbringung. Bei handgehaltenen Geräten bieten sich somit die Potentialgrößen wie beispielsweise Verschiebungen, Drehzahlen und Beschleunigungen als Messgrößen an.

### **3.2 Abbildung des Systemzustands in einer Prüfumgebung**

Um die in Kapitel 3.1 dargestellten Systemzustände einer Anwendung in eine Prüfumgebung zu überführen, muss zunächst geklärt werden, welche Systemgrößen als Vorgabegrößen und welche Systemgrößen als Messgrößen verwendet werden sollen.

Die Werte der Vorgabegrößen der Prüfumgebung müssen durch die Erfassung des Systemzustands vorliegen. Hierbei sind grundsätzlich zwei unterschiedliche Herangehensweisen möglich. Als Vorgabegrößen werden die Potentialgrößen, z.B. Verschiebungen genutzt, die als Messgrößen aus den Aktivitäten, die in Abschnitt 3.1 vorgestellt sind, vorliegen. Die zugehörigen Flussgrößen wie z.B. Kräfte können experimentell durch zusätzliche Messungen in der Prüfumgebung oder simulativ durch Modelle ermittelt werden. Durch die Bestimmung der Flussgröße ergibt sich die Möglichkeit, einzelne Komponenten, deren Eigenschaften sich von den bisher physisch vorhandenen unterscheiden, in der Prüfumgebung virtuell zu untersuchen. Während sich die Potentialgröße durch die Eigenschaften der unterschiedlichen Komponenten ändert bleibt die Flussgröße für die ausgetauschte Komponente gleich. Beispielsweise ändert sich die Anwenderkraft auf das Gehäuse nicht, wenn ein anderes Gehäuse eingesetzt wird, während die Verformung des Gehäuses sehr stark von dessen Geometrie und Material abhängig ist. Die zweite Herangehensweise verwendet die Flussgrößen als Vorgabegrößen. Liegen die schwer messbaren Flussgrößen nicht vor, können diese auch über ihre korrespondierende Potentialgröße und ein entsprechendes Modell, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben wird, ermittelt werden. In

der Prüfumgebung können die Potentialgrößen dann, sofern sie messtechnisch im Gerät erfasst werden, als Messgrößen zur Verifizierung der eingesetzten Modelle genutzt werden.

### **3.3 Rückschlüsse auf weitere Systemgrößen durch Modellbildungsmethoden**

In der Regel sind nicht alle relevanten Systemgrößen einfach messtechnisch erfassbar. Besonders bei Flussgrößen ergeben sich die in Abschnitt 3.1 diskutierten Problemstellungen. Eine Möglichkeit der quantitativen Bestimmung dieser Größen ist die Verwendung von anderen Systemgrößen, insbesondere der korrespondierenden Potentialgröße und einem validen Systemmodell. Das Systemmodell muss die wesentlichen Abhängigkeiten beider Systemgrößen abbilden können. Beispielsweise kann für das Verformungs-Kraft-Verhalten unter Voraussetzung eines bekannten Materialgesetzes ein FEM-Modell die erforderlichen Beziehungen liefern. Diese können anschließend in einem mathematischen Modell mit entsprechender Parametrierung eingesetzt werden.

### **3.4 Validierung der Prüfumgebung**

Die Validierungsaktivität kann in verschiedene Teilvalidierungsschritte aufgeteilt werden. Aspekte hierbei sind die Validierung der Anwendungsfälle und Beanspruchungskollektive, die Betrachtung der Unsicherheiten in den Messgrößen sowie Modellunsicherheiten. Für eine Validierung der gesamten Prüfumgebung ist es notwendig, all diese Aspekte zu untersuchen und eine Bewertung durchzuführen, in welchem Maße diese die Ergebnisse beeinflussen können. Für eine aussagekräftige Bewertung der Anwendungsfälle und des Beanspruchungskollektivs ist es notwendig, Schadensfälle und Verschleißuntersuchungen unter gleichen Randbedingungen der Geräte in der Prüfumgebung und der Geräte in der realen Anwendung mit Anwendern zu untersuchen. Der Vergleich der Ergebnisse kann hierbei zur Validierung genutzt werden. Ergeben sich Unterschiede in den Ergebnissen, müssen deren Ursachen durch Analysemethoden herausgefunden werden. In manchen Fällen führt der Vergleich der Ergebnisse nicht zu einer eindeutigen Bewertung. Hierbei stoßen Validierungsmethoden an ihre Grenzen. Bei der messtechnischen Erfassung der Systemgrößen im Gerät sind die Messungenauigkeiten entscheidend. Die Messgenauigkeit ist vom Messprinzip, den Eigenschaften des Sensors, der Wahl der Messstelle sowie äußeren Einflussfaktoren abhängig. Für valide Messergebnisse ist es notwendig,



alle vier Faktoren zu quantifizieren. Dies ist nicht immer durch scharfe Werte möglich, sodass auch Worst-Case-Betrachtungen oder statistische Methoden eingesetzt werden müssen.

Für die Validierung der Prüfumgebung sind besonders die eingesetzten Modelle zu betrachten. Balci schlägt in [8] einige subjektive und statistische Validierungsmethoden vor, die auch ohne Vergleichsdaten aus dem realen System angewendet werden können. Diese Methoden können Modellfehler identifizieren, sind für eine sichere Validierung jedoch nicht ausreichend. Für eine quantitative Bestimmung der Modellunsicherheit ist eine Referenzmessung unverzichtbar. So kann beispielsweise durch Sensitivitätsanalysen oder Messungen an unterschiedlichen Betriebspunkten die Ungenauigkeit des Modells für die entsprechenden Modellzustände quantitativ erfasst werden.

## **4 Implementierung der Methode an einem Beispielsystem**

Die in Kapitel 3 vorgestellte Methode soll im Folgenden am Beispielsystem *Winkelschleifer* angewandt werden.

### **4.1 Erfassung des Systemzustands eines Winkelschleifers**

Zunächst müssen relevante Anwendungsfälle definiert werden. Hierzu müssen reale Anwendungen beschrieben und geclustert werden. Anwendungen bei Winkelschleifern sind beispielsweise Schruppen von Edelstahloberflächen, Trennen von Metallprofilen und Trennen von Steinplatten. Hieraus lässt sich ein Prüfzyklus ableiten, der für eine auf das Gerät äquivalente Belastung der Anwendung sorgt.

Die Wahl der zu untersuchenden Systemgrößen ist sehr stark von den Fragestellungen abhängig, die durch die Untersuchungen beantwortet werden sollen. Bei der Untersuchung des Anwendereinflusses auf das Gerät sind bei einem Winkelschleifer beispielsweise Motordrehzahl, Motormoment, elektrischer Strom sowie Anwender- und Lagerkräfte wichtige Systemgrößen. Im Folgenden wird auf die Anwender- und Lagerkräfte näher eingegangen. Die Anwenderkraft eines Winkelschleifers ist schwer zu messen, da die Sensorik entweder zwischen dem Gerätegehäuse und dem Anwender auf der gesamten Grifffläche appliziert werden muss oder durch Kraftsensoren gemessen wird, die zwischen Lager und Gehäuse angeordnet sind. Über die der Kraft korrespondierenden Potentialgröße – die Verschiebung – ist im Bereich der Lagerstellen eine Einbringung des Sensors einfa-

cher möglich. Hierfür können beispielsweise Wegsensoren genutzt werden. Diese Sensoren müssen nicht innerhalb des Kraftflusses liegen und haben somit beispielsweise auf die Steifigkeit des Systems keinen Einfluss. Der Messwert von Potentialgrößen ist immer

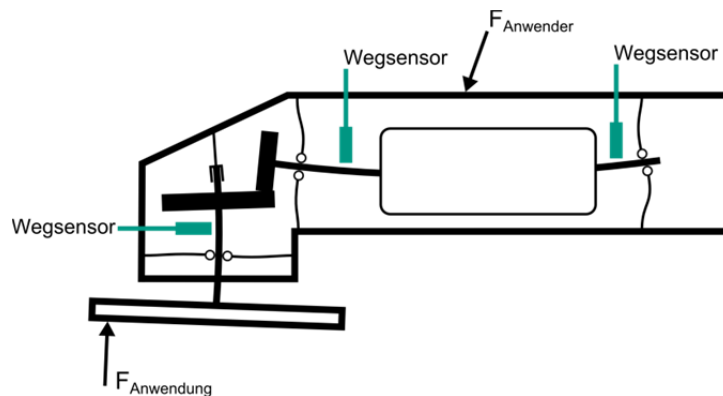


Abbildung 1: Verformung des Winkelschleifers und Anordnung der Messsensorik

bezogen auf einen Referenzwert, sodass eine Differenz gemessen wird [9]. Es ist entscheidend, dass bei der Modellbildung der Systeme und der Messgrößen diese Eigenschaft berücksichtigt wird. Für die Erfassung der Anwenderkraft muss also die Verformung der Bauteile, die sich innerhalb des Kraftflusses befinden, gemessen werden. Es ist möglich, den Wegsensor am Gehäuse anzubringen und die Verschiebung der Welle bezüglich der Stelle des Sensors am Gehäuse messtechnisch zu erfassen (vgl. Abbildung 1). Für die Erfassung der Verformung gilt die Modellannahme, dass das Gehäuse sich nur im Bereich zwischen dem Sensor und der Welle verformen kann. Diese Annahme ist möglich, da das Gehäuse im Bereich der Lagerstellen im Vergleich zur restlichen Struktur eine große Nachgiebigkeit aufweist, d.h. eine Verkipfung der Lagerstellen möglich ist. Diese Verkipfung führt zu einer Lageänderung der Welle, die durch den Wegsensor erfasst wird.

## 4.2 Abbildung des Systemzustands in einer Prüfumgebung

Für die Abbildung des Systemzustands des Geräts in der Prüfumgebung sollen die gemessenen Verschiebungen der Wellen genutzt werden. Die Abbildung der Verschiebung bzw. Verformung der Wellen kann durch Aktoren, die auf die Position der Lagerstellen der Wellen einwirken, realisiert werden. Damit wird es möglich, dass eine der Anwendung äquivalente Belastung auf den Antriebsstrang wirkt. Über die zugehörigen Kräfte lässt sich ohne weitere Systemkenntnis jedoch keine Aussage treffen. Sollen die Kräfte in der Prüfumgebung erfasst werden, können beispielsweise Kraftsensoren integriert wer-

den. Hierbei gilt jedoch auch die in Kapitel 3.1 aufgezeigten Problemstellungen beim Einsatz von Kraftsensoren. Anders als im Gerät sind jedoch die Gestaltungsspielräume bei der Platzierung des Sensors größer, sodass unter Einbeziehung der mechanischen Eigenschaften des Sensors eine Kraftmessung oftmals möglich ist.

#### 4.3 Rückschluss auf die Anwenderkräfte durch Modellbildungsmethoden

Ist der Einsatz von Kraftsensoren in der Prüfumgebung ebenfalls nicht möglich, bleibt die Ermittlung der Kräfte durch zusätzliche Informationen aus Modellen. Im Falle der An-

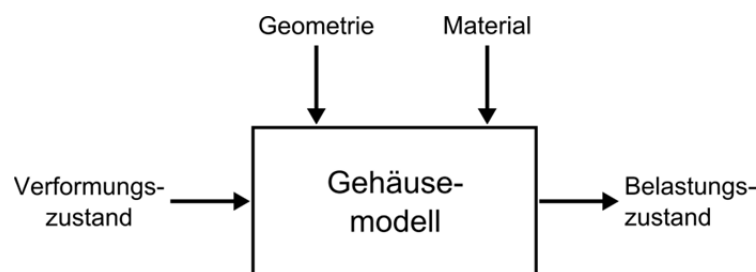


Abbildung 2: Gehäusemodell

wenderkraft ist es möglich, dass die Beziehung zwischen Kraft und Verformung durch ein Gehäusemodell (vgl. Abbildung 2) bekannt ist. Hierbei ist beispielsweise ein FEM-Modell erforderlich. Die Kraft-Verformungs-Beziehung unterliegt einer Ungenauigkeit, da diese durch Modellbildungsmethoden entstanden ist. So wird die Annahme getroffen, dass die Verformung allein im Gehäuse stattfindet, d.h. dass die Lagerstellen beispielsweise nicht zur Verformung beitragen. Ebenfalls wird vorausgesetzt, dass das verwendete Materialgesetz für das Gehäuse gültig ist. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Lage der Messstellen, da bei Potentialgrößen diese einen großen Einfluss haben. Sind all diese Aspekte berücksichtigt, können auch Anwenderkräfte ohne die Messung durch Kraftsensoren ermittelt werden.

#### 4.4 Validierung der Prüfumgebung

Welche Aussagekraft die Systemgrößen und Abbildung in der Prüfumgebung haben, muss in den Validierungsaktivitäten geklärt werden. Die Validierung der Anwendungsfälle muss durch den Vergleich von Verschleiß an Komponenten und Schadensfällen der Versuchsgeräte und Geräten aus Feldversuchen erfolgen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass eine ausreichende Menge an Versuchsgeräten notwendig ist, um eine statistische Absi-

cherung zu gewährleisten. Für die Validierung der Prüfumgebung können die Ausfälle von Komponenten aus Feldversuchen und Prüfscenarien mit dem Gerät genutzt werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, die eine ganzheitliche Betrachtung bei der Untersuchung von Geräten zulässt. Es werden Handlungsanweisungen vorgeschlagen, wie Systemgrößen und Messgrößen in Hinblick auf deren Relevanz für die Untersuchungsziele festgelegt und mittels Sensorik und Modellbildungsmethoden in eine Prüfumgebung überführt werden können. Eine Prüfumgebung, die sich aus der vorgestellten Methode ableiten lässt, ist in der Lage, die Belastungen und Randbedingungen, die in realen Anwendungen auftreten, unter ähnlicher Beanspruchung des Gerätes abzubilden. Es werden Methoden aufgezeigt, die es ermöglichen, Systemgrößen zu quantifizieren, die im Gerät nicht durch direkte Messverfahren erfasst werden. Die Validierungsaktivität, die in der vorgestellten Methode ein zentrales Element darstellt, sorgt für die Sicherung der Annahmen und kann die Aussagefähigkeit von Untersuchungsergebnissen qualitativ und quantitativ angeben.

Die Methode zeigt eine Möglichkeit einer formalen Herangehensweise für die realitätsidentische Prüfung von Geräten. Im nächsten Schritt ist es notwendig, die dargestellte Methode bei Untersuchungen von Geräten anzuwenden, um den Anforderungen der unterschiedlichen Untersuchungsaufgaben gerecht zu werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Matthiesen, Sven; Mangold, Sebastian; Schäfer, Tobias: *Modellierung und Simulation des Hand-Arm-Systems bei stoßartiger Anregung*. [Hrsg.] D. Krause, et al. Bamberg : TuTech Innovation, Oktober 2012. Design for X: Beiträge zum 23. DFX-Symposium. ISBN: 978-3-9414-9251-6
- [2] Cronjäger, Ludolf; Jahn, Reiner; Riederer, Herbert: *Entwicklung eines Versuchsstandes zur reproduzierbaren Messung der Vibration schlagender handgeführter Maschinen*. Opladen: Westdeutscher Verlag, 1984
- [3] Hansson, Jan-Erik; Kihlberg, Steve: *A test rig for the measurement of vibration in hand-held power tools*. Applied Ergonomics. 1983, pp. 11-18
- [4] Marcotte, Pierre; Boutin, Jérôme; Jasinski, Juliana: *Development of a hand-arm mechanical analogue for evaluating chipping hammer vibration emission values*. Journal of Sound and Vibration. 2010, pp. 1968-1980

- [5] Schenk, Thomas: *Automatisierte Messung der Schwingungsemission von Handmaschinen*. Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse. Dortmund : Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse Nr. 118, 2000. Bd. 118
- [6] Albers, Albert; Behrendt; Matthias; Ott, Sascha: *Systematisch zu Mobilitätslösungen*. AutomobilKONSTRUKTION. 2012, 02
- [7] Matthiesen, Sven; Schäfer, Tobias, Mangold, Sebastian; Durow, Wasili: *X-in-the-Loop in der Gerätebranche - Ein ganzheitliches Validierungsframework unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Anwender, Gerät und Anwendung*. Stuttgart, 2013. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2013 SSP 2013
- [8] Balci, Osman: *How to assess the acceptability and credibility of simulation results*. Simulation Conference Proceedings, 1989. Winter. 1989
- [9] Barzilai, Jonathan: *Basic Principles of Measurement*. Tucson, AZ: IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2001. ISBN: 0-7803-7087-2



## Entwicklung kontextsensitiver Standards in modularen Produktplattformen

Johannes van der Beek, Kevin Schmitz, Jörg Feldhusen

LEHRSTUHL UND INSTITUT FÜR ALLGEMEINE  
KONSTRUKTIONSTECHNIK DES MASCHINENBAUS, RWTH Aachen

Steinbachstr. 54, 52074 Aachen

E-Mail: {vanderbeek, schmitz, feldhusen}@ikt.rwth-aachen.de; Internet: <http://www.ikt.rwth-aachen.de>

**Inhalt:** *Kundenindividuelle Produkte und die Präsenz auf globalen Märkten lassen die Produktvielfalt in vielen Unternehmen wachsen. Ein Unternehmen, welches Anlagen mit hohem Anteil an Komponenten mit kurzen Technologiezyklen anbietet, steht vor der ständigen Herausforderungen eine flexible Grundstruktur von Produkten und Prozessen vorzuhalten. Produktstandardelemente und Systemlösungen in Kombination mit einer flexiblen Plattform bieten erhebliches Rationalisierungspotential.*

*Diese vorgedachten Produktelemente sind entweder im Unternehmen existent oder müssen entwickelt werden. Die notwendigen Standards, deren Anzahl und deren konstruktive Umsetzung sind stark kontextgebunden, sowohl produkt- als auch unternehmensspezifisch. Die Methode zur kontextsensitiven Standardentwicklung unterstützt die Findung und Entwicklung idealer Produktstandardelemente. Dabei gliedert sich das Vorgehen in eine Analyse der Ausgangssituation, um notwendige Merkmale eines zukünftigen Standards zu identifizieren und diesen in einer anschließenden Synthesephase zu konzipieren und abschließend als neuen Standard zu definieren. Dabei wird die Nutzung der Vorgehensweise an zwei konkreten Anwendungsbeispielen validiert.*

**Abstract:** *Customized products and the presence on global markets cause a growing range of products in many companies. A company which deals with facilities with high amount of components with short technology lifecycles is meeting the challenge of providing a flexible basic structure of products and processes. Product standard elements and systems solution embedded in a flexible product platform influence the rationalization capability powerful.*

*Some of these product elements still exist in a company or they have to be developed. The necessary kind of standards, there quantity and there design are strongly bound to the context, firm-specific and product-specific. The method of context-sensitive standard development provides the identification and definition of ideal product standard elements. The procedure analyses an existing product for identifying necessary features of a future standard. In a synthesis of the knowledge is concreted to design and define the new standard. The usability of the procedure is shown by two industrial samples.*

**Stichwörter:** Modularisierung, Standardisierung, Produktstandardelemente

**Keywords:** Modularization, standardization, product standard elements

## 1 Einleitung

Die zunehmende externe Vielfalt sichert einen breiten Kundenstamm und damit den Erfolg eines Unternehmens durch ein möglichst kundenspezifisches Produktangebot. Diese externe Vielfalt beeinflusst die Organisation stark, der Aufwand zur Komplexitätsbeherrschung ist mitunter enorm. Die Komplexität wird dabei auch von der Elementvielfalt, diese wiederum von der Anzahl und der Art von Elementen beeinflusst [1]. Ein probates Mittel zur Reduktion dieser Komplexität in Form von Prozessen, Komponenten, Baugruppen, Produktdokumenten und –daten, ist die Modularisierung [2]. Der Gedanke Einheiten mit klar definierten Schnittstellen vor zu entwickeln und diese in Plattformen mit geringem, planbarem auftragsbezogenem Aufwand zur kundenindividuellen Lösung zu bringen ist ein Rationalisierungsansatz in der modernen Produktentwicklung [3]. Gerade große Unternehmen bewältigen diesen Mehraufwand in der Planungsphase eines Produktes mit ganzen Abteilungen, die mit entsprechenden Standardprozessen Plattformen und Module entwickeln und pflegen. Eine größere Herausforderung besteht für kleinere Unternehmen, bei denen eine gewachsene Produktstruktur in ein modulares Produktkonzept überführt werden muss. Sogenannte Multi-Life-Produkte ermöglichen es schnell und ohne den Aufwand einer kompletten Produktüberarbeitung neue Komponenten in das Produktportfolio aufnehmen zu können [3]. Dabei ist der richtige Grad an Flexibilität entscheidend, zu viel Flexibilität wirkt sich negativ auf die Produktqualität und den notwendigen Aufwand zur Sicherung dieser aus. Zu starre Vorgaben machen kurze Lebenszyklen einer Plattform und deren Module notwendig. Es gilt also einen idealen Grad aus Flexibilität und vorgeordneten Produktelementen zu finden um die externe Vielfalt mit einer optimierten internen Komplexität abzubilden. Eine entscheidende Größe dabei ist die Varianz innerhalb eines Produktes um einzelnen Zielgruppen gerecht werden zu können. Varianz beschreibt dabei die Abweichung von einem Standard. Gelingt es nicht den Markt mit einem Standardprodukt zu bedienen ist die Konfiguration eine Lösung, um ohne zusätzliches Produkt den vermeintlichen Anforderungen gerecht zu werden [4]. Damit einher geht eine Steigerung der Produktkomplexität, da Wechselwirkungen und mehrdimensionale Abhängigkeiten zwischen den Komponenten zunehmen.

Diese Komplexität zu beherrschen und ein Produkt von hoher Qualität und Wettbewerbsfähigkeit anbieten zu können ist ein Ziel der Produktmodularisierung. Modularisierung bedeutet Zergliederung in abgeschlossene Einheiten, die aufgrund eindeutig definier-



ter Schnittstellen unabhängig entwickelt, konstruiert, gefertigt und geprüft werden können. Durch diese Schnittstellendefinition sind die Module im Produkt ersetzbar und ermöglichen eine Individualisierung einer komplexen Produktstruktur ohne stets das Gesamtsystem zu beeinflussen.

Um die Modulentwicklung rational abbilden zu können und die notwendige Modulfunktionalitäten nicht bei jeder Entwicklung neu festzulegen sind plattformweite Standards zu definieren. Diese Grundkonzepte von Modularisierung sind in vielen Unternehmen bekannt und allgemein anerkannt, die Umsetzung dieser Gedanken birgt einige Schwierigkeiten. Im Besonderen sind bestehende Lösungen nur selten direkt übertragbar, weil Randbedingungen nicht oder nur mäßig erfüllt werden. Weiter ist die Begründung warum ein Standard unzureichend ist nur selten transparent und die gemeinsame zielgerichtete Entwicklung einer Produktplattform und dessen Module gelingen nur mit Missverständnissen der Aufgabenstellung.

Es besteht die Notwendigkeit einer Methode die zum einen die Bewertung der vorhandenen, zum anderen eine Ableitung der notwendigen Standards und deren Konkretisierung unterstützt [5]. Standards müssen dabei nicht zwangsläufig Bauteile sein, dies können auch Systemlösungen sein, die auf konkrete Aufgabenstellungen übertragbar sind. Ein Standard sollte dabei eine Lösung und all deren Parameter beschreiben, um diese auf zukünftige Probleme anwenden zu können.

## **2 Ausgangssituation und vorliegende Daten**

Die Ausgangssituation des Entwicklungsvorhabens sieht ein bestehendes Produkt vor, welches durch ein Nachfolgeprodukt mit höherem Standardisierungsgrad abgelöst werden soll. Dieses Produkt erfüllt durch eine Vielzahl von Produktvarianten die Kundenbedürfnisse gut und es sollen keine wesentlichen Produktfunktionen verändert werden. Vielmehr liegt der Fokus auf einer Produktneustrukturierung und der Möglichkeit in Zukunft effizienter Produktvarianten pflegen und in das Produktportfolio einbinden zu können. Ziel ist also eine Plattformentwicklung auf Grundlage eines bestehenden variantenreichen Produktes. Dieser Variantenreichtum ist den unterschiedlichen Merkmalsausprägungen geschuldet die am Markt nachgefragt werden. Die Frage der notwendigen externen Vielfalt soll nicht weiter betrachtet werden, sondern von einer Lastenheftdefinition der zu realisierenden Produktausprägungen wird ausgegangen. Die Lösung der internen Komplexität der

Produktstruktur in allen Bereichen des Unternehmens soll über den Modularisierungsansatz entgegengewirkt werden. Um die volle Effektivität der Modularisierung nutzbar zu machen ist eine grundsätzliche Überarbeitung der Produkt- und Produktionsstruktur notwendig, nur so können sämtliche grundlegenden Konzeptgedanken umgesetzt werden. Dabei ist bei jeder einzelnen Systemkomponente das Gesamtziel entscheidend, nicht selten ist dies weder sauber formuliert, noch allen Beteiligten in letzter Konsequenz mit seinen Auswirkungen auf Teilsysteme bewusst. Die Ziele von Modularisierung, wie beispielsweise Hierarchisierung, Entkoppelung, Standardisierbarkeit, sind in der Literatur umfangreich formuliert [6]. Allerdings fehlt eine Methode zur Projektion auf Produktkomponenten und dadurch eine Adaption an den individuellen Kontext eines Modularisierungsprojektes mit dem Ziel einer Produktneudefinition.

Die Ausgangssituation ist ein am Markt erfolgreiches Produkt, das mit all seinen Ausprägungen etabliert und für eine neue Produktgeneration in seinen zukünftigen Ausprägungen beschrieben ist. Das Ziel dieser Neuentwicklung ist es vor allem die organisatorischen Aufwände für die Produktbereitstellung zu reduzieren, als Folge eines höheren Modularisierungsgrades.

Was bedeutet Modularisierung konkret für die Produktion eines Produktes? Das die Produktindividualisierung für den Kunden nach Möglichkeit spät und ohne große Wechselwirkungen auf andere Produktbereiche geschehen kann, also eine hohe Flexibilität in der Auftragsabwicklung und Unabhängigkeit der Komponenten und Prozesse ermöglicht wird. Genau diese Unabhängigkeit der Komponenten ist bei einer konsequenten Moduldefinition gewährleistet, eben dadurch, dass über die Modulgrenzen hinaus keine Abhängigkeiten zu anderen Komponenten bestehen dürfen. Weitere Kernanforderung ist eine flexible Basisplattform für spätere Ergänzungen zu schaffen, das heißt eine Modulentwicklung im späteren Produktleben, unter Umständen kundenindividuelle Lösungen, einfach und mit planbarem Aufwand realisieren zu können. Idealerweise kann ein Modul ohne das Gesamtprodukt betrachten zu müssen über Modulrandbedingungen entwickelt, konstruiert, gefertigt und geprüft werden. Sogar eine Entwicklung durch Dritte ist dann denkbar [3].

### **3 Standards und Produktstandardelemente**

Die vorangegangenen Überlegungen machen Standards erforderlich. Nur so ist eine verteilte, zeitparallele und später zeitversetzte Entwicklung überhaupt erst möglich. Diese

Standards sollen die Entwicklung von Teilsystemen dadurch rationalisieren, dass auf eine bestehende Wissensbasis zurückgegriffen wird und vorgedachte Lösungsbausteine verwendet werden [3]. Die Lösungsbausteine können Detaillösungen wie die Befestigung einer Komponente sein oder auch komplette Verdrahtungspläne für eine Anlage. Es ist also nicht die Komponentenstandardisierung im klassischen Sinne gemeint, wo vor allem auf Skaleneffekte abgezielt wird, sondern der Gedanke bei kleinen bis mittleren Stückzahlen eine kosteneffiziente Entwicklung und Herstellung von Teilsystemen abbilden zu können. Dies wird dadurch möglich, dass die Teillösungen eines Systems nur selten vollständig neuartige Aufgaben und dadurch Lösungsprinzipien notwendig machen. Die Einbettung in ein bestehendes Gesamtsystem legt mindestens die Schnittstellen zu diesem fest, häufig sind weitere grundlegende Anforderungen mit der Plattformbasis identisch.

Nach der grundsätzlichen Entscheidung für Standards stellen sich die Fragen, wie viele und welche Standards notwendig sind. Diese Fragen lassen sich nicht allgemein beantworten, weiter ist eine zu starre Festlegung der Lösung durch Standards mit einem eingeschränkten Lösungsraum verbunden.

Ein sinnvolles Maß für die Anzahl an Standards lässt sich über die Funktionsstruktur finden. Nach Aufstellung einer Funktionsstruktur können Funktionen durch Klassifizierung Gruppen zugeordnet werden, so dass funktionale Ähnlichkeit identifiziert werden kann. Die Verwendungshäufigkeit einer Funktion in einem Produkt dient als Indikator für einen möglichen Standard. Dabei sollte das Standardisierungspotential bewusst über die Funktionsbeschreibung (z.B. Komponente befestigen) und nicht über die konkrete Lösung (z.B. M6 x 20 mit selbstsichernder Mutter) identifiziert werden.

#### **4 Konzept zur systematischen Standardentwicklung**

Entscheidend für den Erfolg eines Standards ist dessen Eignung für die zukünftigen Problemstellungen in einem speziellen Kontext. Dieser Kontext ist beschrieben durch das Zusammenspiel von drei wesentlichen Faktoren: dem Unternehmen, in dem er Anwendung finden soll, dem Produkt, in dem er eingesetzt werden soll und dem Projekt, in dem er entwickelt wird.

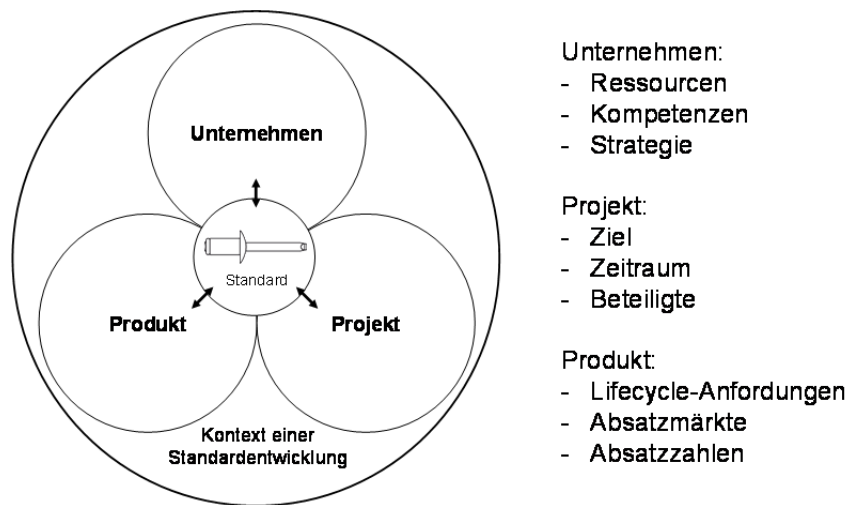


Abbildung 1: Kontext einer Standardentwicklung

Das Unternehmen stellt dabei sämtliche Ressourcen dar die zur Lösung einer Aufgabe zur Verfügung stehen, dies können Kompetenzen oder Anlagen sein. Das Produkt muss in speziellen Märkten bestehen und bringt so individuelle Anforderungen an die Lösung mit. Das Projekt, in dem ein Standard entwickelt oder zur Anwendung kommt hat besondere Zielvorgaben. Ein zu findender Standard muss zur erfolgreichen Einführung in allen drei Bereichen gute Erfüllung der Vorgaben erzielen, andernfalls besteht die Gefahr dass nicht die ideale Lösung gefunden wurde.

Die Methode geht von einem bestehenden Vorgängerprodukt aus für dessen nächste Generation optimierte Standards gefunden werden. Die Vorgehensweise ist dabei folgende:

1. Produktarchitektur aufstellen
2. Produktfunktionen hinsichtlich der Optimierungsgröße quantifizieren
3. Standardisierungspotential identifizieren
4. Standard im Kontext bewerten
5. Standard im Kontext zielgerichtet weiterentwickeln

Im ersten Schritt wird das bestehende Produkt in eine Funktionsstruktur überführt die eine Untersuchung auf Komponentenebene zulässt. In einem zweiten Schritt werden für die Produktfunktionen hinsichtlich der Hauptoptimierungsgröße (z.B. Montagezeit oder Einzelteilkosten) quantifiziert. Die quantifizierten Produktfunktionen lassen so in einen di-

rekten Vergleich untereinander zu und es können Produktfunktionen mit Optimierungspotential identifiziert werden.

Der wesentlichste Schritt der kontextspezifischen Bewertung gibt letztendlich den Indikator für weiteres Entwicklungspotential. Dazu wird der Standard in den drei Bereichen bewertet, wesentliche Kategorien der Unternehmensbewertung sind dabei die Produktions- und Montagemöglichkeiten. Diese sollten aufgeführt werden und der Standard hinsichtlich seiner Überdeckung mit den Unternehmenskompetenzen analysiert werden. Die Bewertung im Produktkontext benötigt die Zielvorgabe des Produktes, beispielsweise den Grad der Konfigurierbarkeit des gesamten Produktes, eine Erweiterbarkeit zu späterem Zeitpunkt und die notwendige Serientauglichkeit einer Produktstruktur, sowie der gewünschte Anteil an Eigenfertigung. Zu diesen produktspezifischen Zielgrößen lässt der bestehende Standard eine Abschätzung der Eignung zu. Zuletzt wird die Eignung eines Standards im Projektkontext validiert, wesentlich dabei ist die Eignung für die Erreichung des primären Projektziels, wie beispielsweise Produktionsstätten auslagern, Montageprozesse vereinheitlichen und vereinfachen, sowie eine kostentechnische Bewertung des Standards. Alle Bewertungen sollten durch interdisziplinäre Gruppen eines Unternehmens validiert werden.

Der wesentliche Vorteil in dem vorgeschlagenen Vorgehen ist, dass transparent wird aus welchen Gründen eine konkrete Lösung entsprechende Eignung aufweist. Anschließend kann strukturiert und nach gemeinsamer Priorisierung einzelner Detailaspekte einer Lösung über neue Lösungskonzepte zielgerichtet diskutiert werden.

## **5 Anwendung**

Zwei Anwendungsbeispiele sollen das Vorgehen verdeutlichen. Beide Beispiele beziehen sich auf die Befestigung innerhalb eines Gehäuses, wobei unterschiedliche Anforderungen an die Lösung definiert werden. Ziel dieser Produktüberarbeitung soll die signifikante Reduktion der Montagezeit mit gleichzeitiger Flexibilisierung der Produktstruktur in Hinblick auf spätere Kundenindividualisierung und Erweiterung beim Kunden sein. Zur Einschätzung der Montagegeschwindigkeit und Widrigkeiten wurde die Montage begleitet und die Montagezeiten aufgenommen. Alle Befestigungspunkte wurden separat aufgenommen, abschließend ihrer konstruktiven Art und ihrer Zuordnung in der Produktarchitektur ausgewertet. Besonders auffällig war die Montage auf Schweißbolzen, diese werden

zur Befestigung an der Gehäuseinnenwand und zwischen Komponenten genutzt. Die Montage dieser Verbindungstechnik ist dabei wesentlich zu aufwändig im Hinblick auf ein zukünftiges Serienprodukt das eine effiziente Fließmontage ermöglichen soll. Das Unternehmen hat erhebliche Kompetenz und Anlagentechnik zur Schweißbolzenverarbeitung und der Einsatz dieser Technologie ist nachvollziehbar und richtig. Das Projekt mit dem Ziel einer drastischen Montagezeitreduktion und Vereinfachung der Montageschritte macht eine Reduktion der Verwendungshäufigkeit und eine alternative Befestigungstechnik erforderlich. Schnell zeigte sich, dass die Produktbereiche in diesem Zusammenhang wesentlich die Anforderungen beeinflussen. So werden an Befestigungen im Interaktionsbereich mit dem Nutzer nur geringe Anforderungen an die mechanische Belastbarkeit gestellt, genauso tritt in diesen Bereichen die Flexibilität stärker in den Hintergrund. Ganz im Gegensatz zu dem Gehäuseinneren in dem teilweise sehr schwere und sehr unterschiedliche Komponenten installiert werden sollen ohne bei jedem Produkt ein auftragsbezogenes Schweißbolzenlayout zu verwenden. Ausgangspunkt für beide Beispiele ist dieselbe Produktfunktion „Komponenten befestigen“ allerdings in unterschiedlichen Produktbereichen, aus diesem Bewusstsein wurden ausgehend von der bestehenden Serienlösung zwei neue Lösungen entwickelt.

### **5.1 Standardisierte Befestigungssystem**

Die Befestigung von Gerätekomponenten in einem Gehäuse kann über die Gehäuseaußenwände stattfinden. Dazu werden Schweißbolzen an diesen angebracht und die Komponenten an diesen angeschraubt. Gerade in Bezug auf die Konfigurierbarkeit des Produktes ist dies allerdings äußerst nachteilig, da in jedem Gehäuse sämtliche Schweißbolzen vorgehalten oder individuelle eingebracht werden müssen. Die wesentliche Optimierungsgröße ist die Flexibilität der Befestigung.

Eine Lösung ist ein flexibles Befestigungssystem mit einer Standardschnittstelle zur Anbindung von Komponenten. Diese sieht eine Befestigung in einem Lochraster mit Hilfe von Blindniete vor. Das Lochraster kann wirtschaftlich durch Wälzprofilieren hergestellt werden. Die Blindnietechnik ist eine sehr effiziente Möglichkeit der Befestigung. In dem beschriebenen Kontext ist die Eignung zum Unternehmen mit Abstrichen zu sehen, da ein Zukaufteil notwendig wird (Wälzprofil). Das Ablängen und Einschweißen passt wiederum gut zum Unternehmensprofil. Die Bewertung im Hinblick auf die Produkt- und Projekteig-

nung haben aber so überzeugt, dass dies als neuer Standard in der Gehäusekonstruktion in Serien gehen wird.

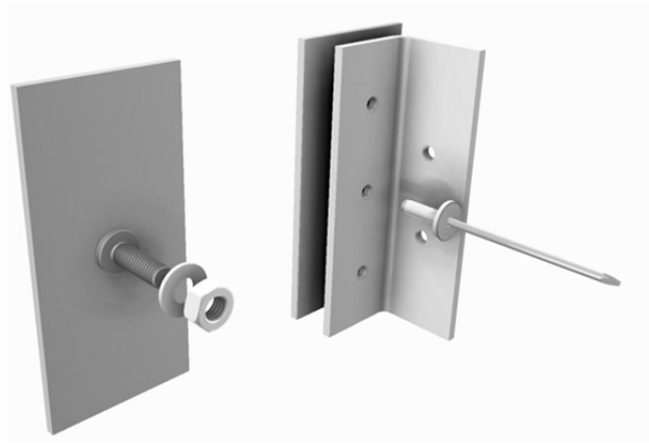


Abbildung 2: Standardisiertes Befestigungssystem (rechts)

## 5.2 Standardisierte Schnellmontageelemente

Die zu prüfende Lösung sieht Schweißbolzen in Verbindung mit selbstsichernden Muttern vor. Diese Lösung wird an Stellen geringer mechanischer Belastung eingesetzt, beispielsweise um ebene Platten zur Herausfallen aus dem Gehäuse zu sichern und zu fixieren. Ein Mangel besteht in der Montage, die notwendigen komplexen Handhabungsschritte, wie vereinzeln, orientieren, fügen mit teilweise kombinierten Bewegungen aus Rotation und Translation begründen auffällig hohe Montagezeiten. Die Flexibilität der Befestigungspunkte spielt in diesem Produktbereich allerdings eine sekundäre Rolle.

Die Suche nach weiteren Möglichkeiten führte zu einer Lösung mit einer steckbaren Kunststoffmutter. Diese muss nicht durch eine überlagerte Bewegung gefügt werden sondern kann translatorisch aufgeschoben werden und muss nur noch definiert verspannt werden. Die reduzierte Teileanzahl durch Wegfall der Unterlegscheibe und die vereinfachten Montageschritte durch eine zwei vereinfachte Handhabungsschritte, dem Aufschreiben und dem definierten Anziehen der Schraubverbindung vereinfachen den Montageablauf. Die Eignung zum Unternehmen, Produkt und Projekt fiel hierbei in allen Kategorien besser als die bestehende Lösung aus, allerdings nur im Kontext einiger eingeschränkter Produktfunktionen, ein ganz wesentlicher Aspekt war die Fall-Back Möglichkeit auf konventionelle Muttern. Beide Standards sind auf Grundlage einer konstruktiven Lösung entstanden, indem man die Produktfunktionen hinsichtlich ihrer Anforderungen separat bewertet und weiterentwickelt hat.



Abbildung 3: Standardisiertes Befestigungselement (rechts)

## 6 Fazit & Ausblick

Die Vorgehensweise hilft eine Aufgabenstellung zu strukturieren und auf seine wesentlichen Merkmale zurückzuführen und daraus Optimierungspotentiale abzuleiten. Weiter schafft dies ein gemeinsames Verständnis einer individuellen Aufgabenstellung. Die praktische Erfahrung konnte zeigen, dass auf diesem Wege innovative Lösungen mit Praxis-tauglichkeit gefunden werden konnten. Im Weiteren sollen detaillierte Handlungsanweisungen und eine Eingliederung in den Produktentwicklungsprozess erarbeitet werden.

## Literatur

- [1] Patzak, G.: Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme, Berlin: Springer, 1982. – ISBN 978-3-540-11783-4
- [2] Gleisberg, J.; Knapp, O.; Pötzel, S.; Becker, M.: Modular Products: How to leverage modular product kits for growth and globalization. München, Stuttgart: RolandBerger Study, 2012. – [http://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland\\_Berger\\_Modular\\_Products\\_Long\\_20120410.pdf](http://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_Modular_Products_Long_20120410.pdf)
- [3] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Konstruktionslehre*, 8. Aufl., Berlin: Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-29568-3
- [4] Franke, H.-J.; Hesselbach, J.; Huch, B.; Firchau, L. N.: *Variantenmanagement*, München: Hanser, 2002. – ISBN 3-446-21730-4
- [5] Firchau, L. N.: *Variantenoptimierte Produktgestaltung* (Dissertation), Göttingen: Cuvillier, 2003. – ISBN 3-89873-934-1
- [6] Göpfert, J.: *Modulare Produktentwicklung* (Dissertation), Wiesbaden: Gabler Verlag, 1998. – ISBN 3-8244-6827-1



## Interdisziplinäre Produktplanung und Produktdefinition – ein Turmbau zu Babel ?

**Henrik Schnegas**

Lehrstuhl für Konstruktions- und Apparatechnik, Hochschule Wismar,

Fachbereich Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik

Philipp-Müller-Str. 14, PF 1210, 23952 Wismar

E-Mail: henrik.schnegas@hs-wismar.de

**Inhalt:** Die Entwicklung eines neuen Produktes erfolgt betriebswirtschaftlich betrachtet als Projekt, in dem eine interdisziplinäre und oft auch interkulturelle Zusammenarbeit zwischen unterschiedlichen Abteilungen notwendig ist. Neben Maschinenbauingenieuren gehören gleichberechtigt Technologen, Betriebswirtschaftler, Designer oder Qualitätsbeauftragte zum Team, die i.d.R. über individuelles und spezifisches Fach- und Methodenwissen verfügen, welches bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung aufeinander trifft und sehr oft zu Irritationen und schwerwiegenden Verständigungsproblemen führt. Aktuelle Statistiken weisen Kommunikations- und Verständnisprobleme als häufigsten Grund für das Scheitern von Projekten aus. Daraus resultiert die Notwendigkeit, dass in Ergänzung zu den Arbeitsschritten der fachspezifisch publizierten Methoden noch vor den eigentlichen Arbeitsschritten eine gemeinsame Sprache und gemeinsame Begriffe als weitere Prozessaktivität definiert und auch dokumentiert werden. Ein Verständigungsdokument wird somit zu einem neuen Meilenstein im Projekt.

**Abstract:** Development of new products we can also name projects. In the most projects teamwork between engineers, designers, quality managers, business administrators a.s.o. is necessary. In every day work each specialist has an own specific language and own methodological knowledge. Communication and understanding problems are the most significant reasons for failure of projects. Before project start, it's necessary to define and document common terms for communication. Document of understanding is so a new milestone in projectmanagement.

**Stichwörter:** Projektmanagement, interdisziplinäres Projektteam, Begriffs-, Produkt- und Prozessdefinition als Meilenstein, Anforderungsliste, Pflichten- und Lastenheft .

**Keywords:** Project management, interdisciplinary project team, product- and process definition as a milestone, system specification, requirements specification.

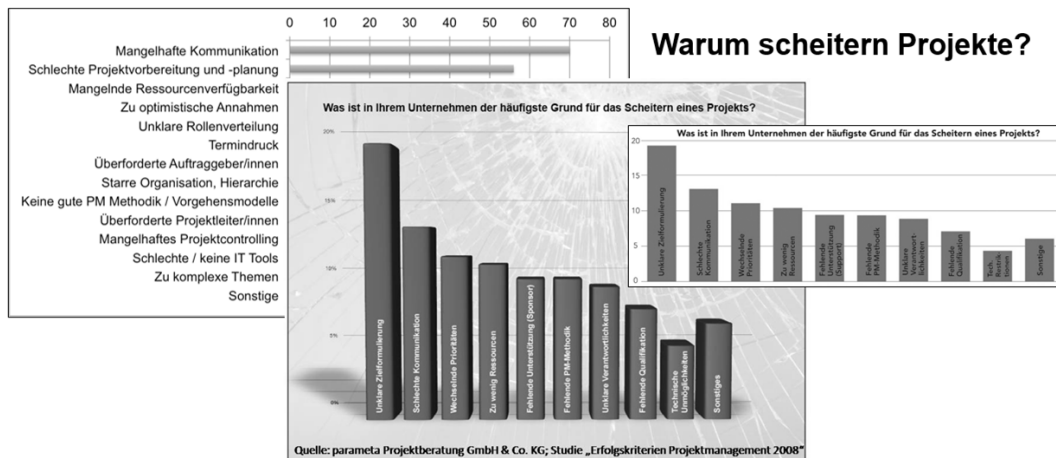
## 1 Projekte im Wandel der Zeit

Große Vorhaben, bei denen der Mensch seine Wünsche, Hoffnungen und Sehnsüchte realisieren möchte, prägen seit eh und je das Dasein der Menschheit. Nicht selten stehen diese Vorhaben im Zusammenhang mit einem gesteigerten Geltungs- und Selbstdarstellungsbedürfnis. Eines der ältesten und auch bekanntesten Vorhaben ist im Alten Testament beschrieben. Nach dem Ende der Sintflut siedelten die Überlebenden und zugleich Auserwählten zwischen Euphrat und Tigris im Lande Schinar, wo sie eine prächtige Stadt errichteten. Aus einem bereits beschriebenen Selbstdarstellungsbedürfnis heraus begannen sie einen Turm zu bauen, der bis zum Himmel reichen und sie gottgleich werden lassen sollte. Um das zu verhindern, wurde seitens Gottes ein sprachliches Wirrwarr gestiftet, wonach die Bauleute sich fortan nicht mehr verständigen konnten, auseinandergingen und das Vorhaben, den Turm zu bauen, unvollendet abgebrochen werden musste.

Dieses sprachliche Wirrwarr - hebräisch ba-bel (לבב) - führte zum bekannten sagenumwogenen Stadtnamen Babel oder auch Babylon und zu einer Beeinflussung der Sprache bis in unsere heutige Zeit. Wenn jemand nicht verstanden wird liegt das am Babbeln bzw. Brabbeln. Griechisch wurde βάβραπος das Stammeln bzw. unverständlich Sprechen abgeleitet. Babelfish, Babylon oder Babel sind die Namen für Wörterbücher oder Übersetzungsprogramme. Der Turm zu Babel ist weltweit ein Synonym für ein nicht realisierbares oder abgebrochenes Vorhaben, ein babylonisches Sprachgewirr ist Synonym für Missverständnis bzw. Verständigungsprobleme.

Betrachten wir die heutige Zeit, werden Vorhaben allgemein als Projekt bezeichnet. Projektskizzen, Projektanträge, Projektteams, Projektbesprechungen gehören zum Vokabular eines Ingenieurs, der vielleicht sogar den Titel Projektingenieur trägt. Nach DIN 69901 ist ein Projekt ein zeitlich befristetes, zielorientiertes, neuartiges, komplexes und oft fachgebietsübergreifendes Vorhaben. Projekte liegen außerhalb der Routinetätigkeit, erfordern interdisziplinäres Verständnis, konkrete Lösungswege ergeben sich oft erst während der Arbeit und der Ausgang ist nicht selten ungewiss.

Aktuelle Projekte haben jedoch sehr oft einen unmittelbaren Bezug zum Turmbau zu Babel. Befragungen von Unternehmen zum Scheitern ihrer Projekte (siehe Abbildung 1) ergaben, dass Kommunikationsprobleme, unzureichende Produkt- und Prozessdefinitionen und allgemeine Verständnisprobleme zu den häufigsten Gründen des Scheiterns von Projekten gehören.



### Kommunikations- Definitions-, Verständnisprobleme

Abbildung 1: Gründe für das Scheitern von Projekten

## 2 Sprachwirrung im Projektmanagement

Die Bearbeitung von Projekten ist heute i.d.R. ein interdisziplinäres und nicht selten interkulturelles Vorhaben. In Abbildung 2 wird z.B. für die Projektierung und Konstruktion einer Anlage für die Herstellung von Schaumküssen in der Lebensmittelindustrie die breite Spanne beteiligter Fachgruppen aufgezeigt, die während des laufenden Projektes miteinander agieren müssen, um das Entwicklungsziel zu erreichen. Probleme bereitet dabei erfahrungsgemäß vor allem das unterschiedliche Methodenwissen, womit bereits die alltäglichen Arbeitsabläufe zu Missverständnissen führen können, wenn zuvor nicht die unterschiedlichen Sicht- und Denkweisen dargelegt und aufeinander abgestimmt werden.

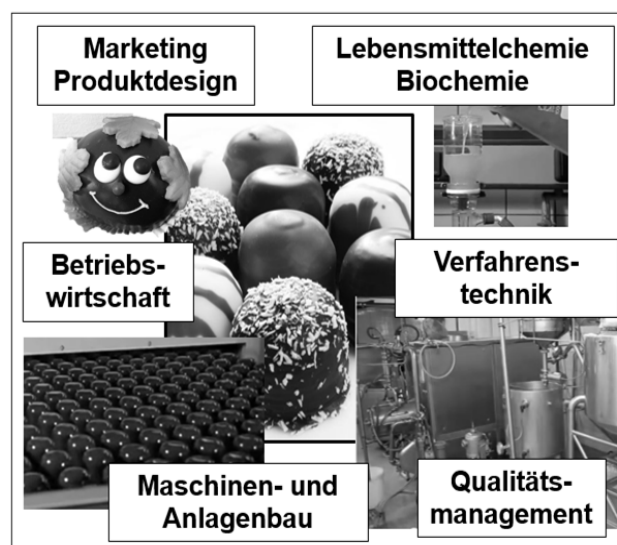


Abbildung 2: Projektpartner im Projekt „Schaumkussmanufaktur“

### **3 Monodisziplinäres Managementverständnis**

So unterschiedlich wie die an den Projekten beteiligten Fachgruppen mit ihrem Fachwissen, sind auch die fachgruppenspezifisch definierten Vorgehensweisen. In den folgenden Ausführungen sollen beispielhaft für das Projekt „Schaumkussmanufaktur“ Methoden beteiligter Fachgruppen vorgestellt werden.

#### **3.1 Maschinen- und Anlagenbau**

Um spätere Vergleiche anführen zu können, wird zunächst ohne umfassende Erläuterung die für Maschinenbauer und Anlagentechniker vertraute Methodik nach VDI 2221 dargestellt, die mit den Phasen Planung, Konzept, Entwurf und Ausarbeitung und den integrierten Arbeitsergebnissen Anforderungsliste, Funktionen, Funktionsstruktur, Konzepte, beste Lösung und Gesamtentwurf inkl. Dokumentation eine fachspezifische Vorgehensweise primär für Neukonstruktionen vorgibt, jedoch auch für die Varianten- und Anpassungskonstruktionen modifiziert werden kann.

#### **3.2 Fluid- und Automatisierungstechnik**

Viele Konstruktionen sind in der heutigen Zeit ohne mechatronische und automatisierungsrelevante Funktionen undenkbar. Im Unterschied zur Methodik der Maschinenbauer lebt dieses Fachgebiet hauptsächlich von der Auswahl und Anwendung bereits existierender Technologien, die im aktuellen Projekt individuell mittels Leistungskennziffern angepasst werden müssen. Wie in Abbildung 4 dargestellt, werden nach einer Auswahl existierender Technologieschemen und Schaltplänen, die zu bewegenden und anzutreibenden Elemente wie Düsen, Förderbänder, Greifer u.a. dimensioniert und danach im Anschluss an die Auswahl notwendiger Steuer- und Regelelemente die geeigneten Antriebselemente gewählt. Begriffe wie Lastenheft, Funktionsstrukturen und Auslegung relevanter Komponenten liegen vor, weisen jedoch in ihrer Bedeutung im Unterschied zur VDI 2221 spezifischere Inhalte auf. Forderungen und Wünsche beziehen sich vor allem auf zeitbezogene umzusetzende Bewegungsabläufe. Komponenten werden hinsichtlich erforderlicher Kräfte und Geschwindigkeiten bzw. Drehzahlen ausgewählt und nur in den seltensten Fällen neu erdacht und individuell gefertigt.

Ebenfalls in Abbildung 4 dargestellt ist eine nachträglich vorgenommene Zuordnung der einzelnen Arbeitsschritte zu den in der VDI 2221 genannten Projektphasen. Gegeben

ist somit eine abgegliche Zuordbarkeit zu eventuellen harmonisierten Meilensteinen im Projekt.



Abbildung 3: Methodik nach VDI 2221

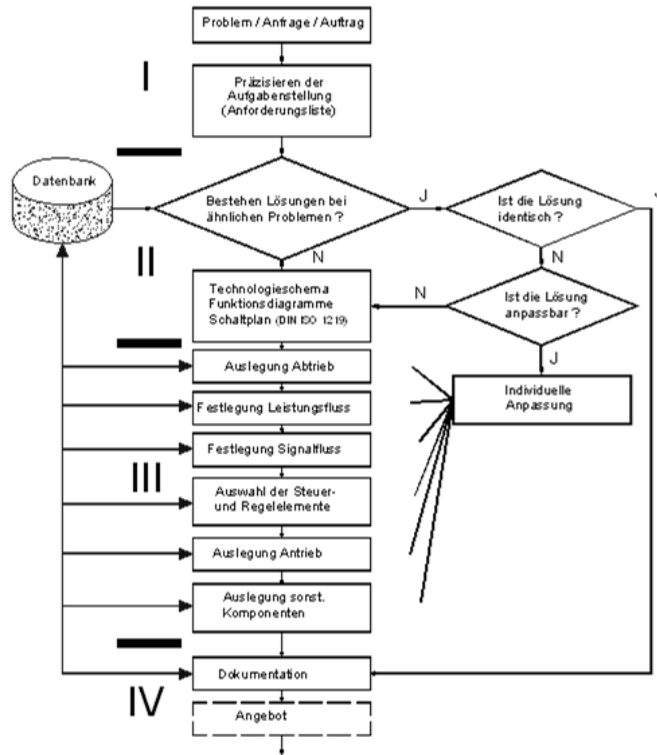


Abbildung 4: Methodik Fluidik, Automatisierung

### 3.3 Produkt- und Industriedesign

Designer gehören insbesondere in größeren Unternehmen zu jedem Projektteam. Im Zentrum der Aktivitäten stehen Handlungsweisen, die den Nutzer bzw. Anwender in den Mittelpunkt stellen. Methodisch werden nach einer umfassenden Systemanalyse und Einordnung des zu entwickelnden Produktes in das Umfeld des Anwenders in einer Entwurfsphase Konzepte generiert, die als Entwurf bezeichnet werden. Im Unterschied zu maschinenbaulich orientierten Handlungsweisen ist die designerische Vorgehensweise freier und weniger vorgebeorientiert. Kreativität bestimmt das Handeln. Während im Maschinenbau vor allem virtuelle Produkte am Ende vorliegen, sind im Designprozess physische Modelle relevant, an denen die zuvor definierten Anforderungen überprüft werden können. Vorteile bringt die frühzeitige Erlebbarkeit der zu entwickelnden Produkte, d.h., dass z.B. taktiles und haptisches Empfinden erlebt werden kann.



Abbildung 5: Phasenkonzept für Designprojekte

### 3.4 Prozess- und Verfahrenstechnik

Im vorliegenden Projekt „Schaumkuss“ ist ein umfassendes Wissen über Lebensmittel und die bei der Herstellung angewandten Verfahrenstechniken von Bedeutung. Auf der einen Seite werden für die Auswahl notwendiger Komponenten die natürlichen, aber auch bio-chemischen Eigenschaften und Prozessparameter benötigt. Genutzt werden kann aber auch eine unmittelbare Zusammenarbeit, in der z.B. Prozesseigenschaften wie Geschwindigkeiten, Verweildauern, Fließverhalten, Anhaftungseigenschaften lebensmitteltechnisch variiert und physische Komponenten optimiert eingesetzt werden können.

In Abbildung 6 ist ein aktuell angewandtes Phasenmodell dargestellt. Erkennbar ist, dass vor allem verfahrenstechnische Laboraktivitäten im Vordergrund stehen. Die Ergebnisse der Lebensmittel oder Prozesse werden sprachlich als Prototyp bzw. Muster bezeichnet. Begriffe wie Lastenheft und Pflichtenheft sind bekannt. Enthalten sind aber vor allem biologische bzw. bio-chemische Randbedingungen.

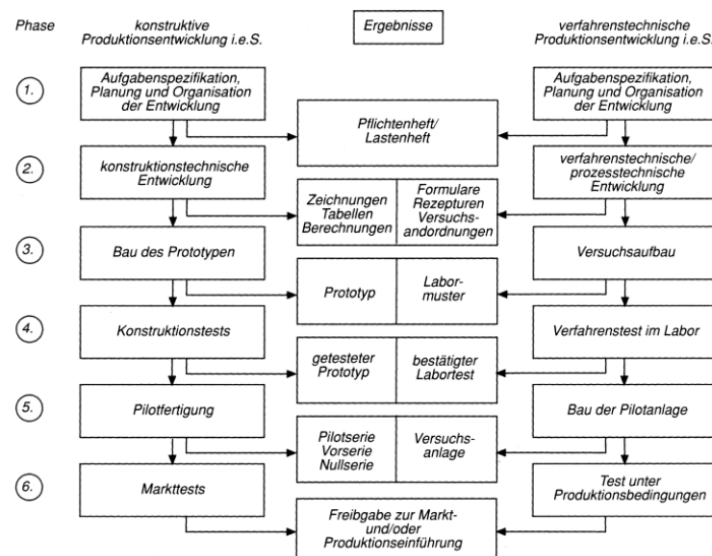


Abbildung 6: Phasenkonzept der konstruktiven Produkt- bzw. verfahrenstechnischen Prozessentwicklung

### 3.5 Projekt-und Qualitätsmanagement

Als letztes in dieser Dokumentation aufgeführt, im Rahmen des Projektablaufes aber übergeordnet anzuwenden, steht die Methodik des Projekt- und Qualitätsmanagements. Nach DIN 69901 gliedert sich jedes Projektmanagement in die Phasen Vorlauf/Planung, Durchführung, Abschluss und das übergeordnete Projektcontrolling.

Im Vorlauf werden die Ziele des Projektes definiert und ressourcenrelevante Belange in Bezug auf Budget, Personal einschließlich Verantwortlichkeiten und technische Ausstattung geklärt. Mit Blick auf die Durchführung ist der Ablauf zu planen. Mit Hilfe von Projektmanagementwerkzeugen nach Abbildung 8 sind Meilensteine festzulegen, was bei Projektverantwortlichkeit durch die Betriebswirtschaft jedoch recht diffus ausfallen kann, da das Vokabular der bisher vorgestellten technischen Partner im Normalfall nicht gelebt wird.

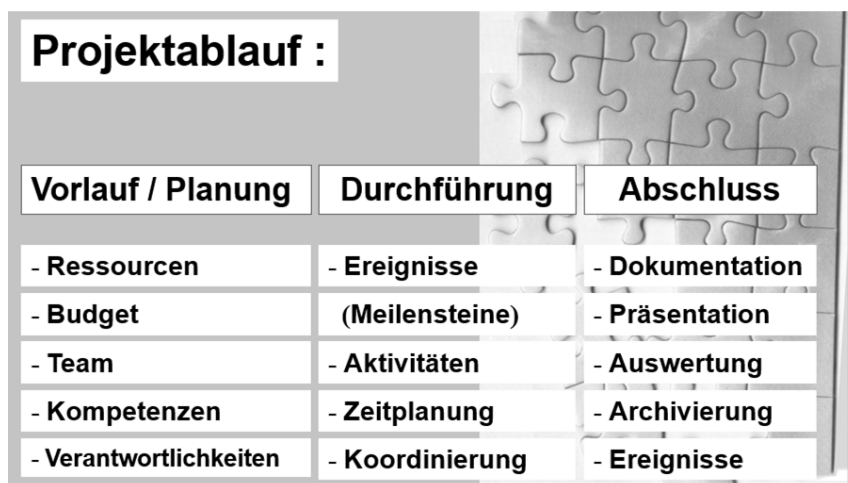


Abbildung 7: Gliederung Projektablauf nach DIN 69901

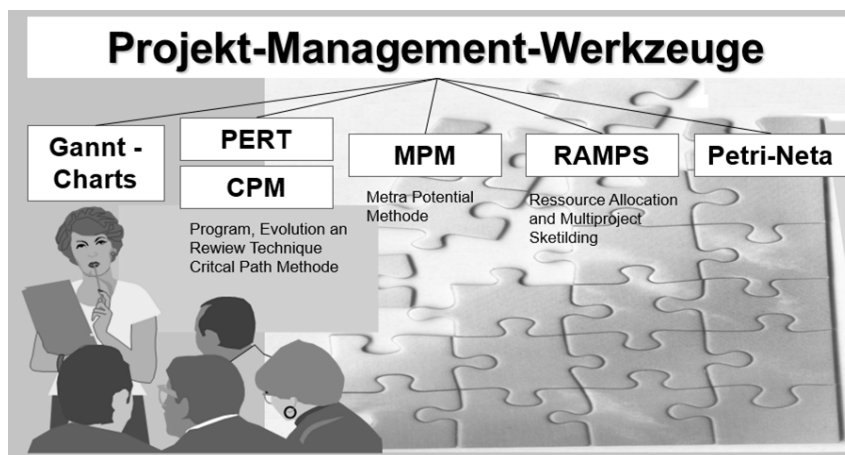


Abbildung 8: Projektmanagementwerkzeuge

Sinnvoll erscheint in diesem Zusammenhang die verstärkte Zusammenarbeit der Fachgruppen und die Aneignung und der Abgleich ablaufrelevanter Methoden, wie sie in der Technik bereits erfolgreich angewendet werden. Ein erster Ansatz liefert die in den letzten Jahren forcierte Qualitätsmethode Six Sigma. Als Verbesserungstool für betriebsinterne Prozesse eingeführt, hat sie sich im Rahmen eines Design for Six Sigma (DFSS) als Ablaufmethode weiterentwickelt. Während das Kernverfahren DMAIC vor allem für die Verbesserung bestehender Prozesse, Dienstleistungen geeignet ist, wird mit DMEDI eine Variantenkonstruktion unterstützt. Am weitesten ist jedoch die DMADV-Methode so modifiziert worden, dass der Konstruktionsprozess abgebildet werden kann. Versäumt wurde jedoch, bestehendes Methodenwissen aufzugreifen. Stattdessen wurde ein eigenes Vokabular generiert, an das sich nun bestehendes Methodenvokabular anpassen muss.

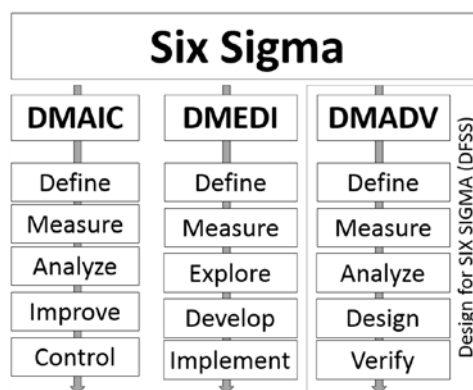


Abbildung 9: SIX Sigma Methoden

In der **Define Phase** wird das angestrebte Produkt definiert. Verwendung finden vor allem Qualitätswerkzeuge wie das House of Quality / Quality Function Deployment (QFD), die bestehende Mitbewerberprodukte mit einbeziehen, somit aber für Innovationen (Neukonstruktionen) nur unzureichend geeignet sind. Hinter den Begriffen VOC und CtQ verbirgt sich Voice of Customer, womit die Sprache des Kunden gemeint ist, die nach etablierten Methoden im Lastenheft enthalten ist. In Bezug auf Critical to Quality sind alle Kenngrößen enthalten, die maßgebend die Qualität beeinträchtigen. Diesbezügliche Kenngrößen sollten bereits Inhalt jedes Pflichtenheftes bzw. jeder Anforderungsliste sein. In der **Measure Phase** werden Konzepte erarbeitet und in der **Analyze Phase** bewertet. Beide Phasen können uneingeschränkt mit der Konzeptphase nach VDI 2221 gleichgesetzt werden. Ergänzung finden diese Phasen jedoch mit einer gezielten FMEA zum Aufdecken von Schwachstellen, einer Risikoanalyse, wie sie ohnehin im Rahmen der CE-



Kennzeichnung verlangt wird und einer erweiterten QFD zum Aufdecken kritischer Lieferanten und Prozesse. Eine Einschränkung ergibt sich im Unterschied zur klassischen Vorgehensweise in der Anwendung der Plugh-Bewertungsmatrix, die auf der Basis einer Benchmark in Form eines Vergleichsproduktes agiert, was das Vorliegen eines bestehenden Produktes voraussetzt und somit wiederum eine Innovation ausschließt.

In der **Designphase** wird mit Hilfe mathematischer Methoden das Produkt detailliert. Prozessfähigkeitsuntersuchungen, Prototypenerstellungen und Testphasen runden diese Phase ab. Am Ende steht dann eine **Verify-Phase**, wo die gestellten Qualitätsforderungen und die VOC abgeglichen werden. Im Vergleich zur klassischen Konstruktionsmethodik wird dieser Punkt als sinnvolle, qualitätsbeeinflussende Ergänzung angesehen.

#### 4 Lastenheft, Pflichtenheft, Anforderungsliste

In allen dargestellten Methoden wird die Definition der konkreten Aufgabenstellung berücksichtigt. Schwierigkeiten dürften jedoch die individuellen Bezeichnungen bringen. Lastenheft, Pflichtenheft, Anforderungsliste, Fachspezifikation, fachliche Spezifikation, Fachfeinkonzept, Gesamtsystemspezifikation, Sollkonzept, Fachkonzept, Funktionelle Spezifikation, Implementierungsspezifikation oder englisch *Feature Specification*, *requirements specification*, *list of requirements*, *voice of Customer*, *systems specification* u.a. stehen gleichberechtigt nebeneinander. Analysen ergaben, dass Unterscheidungen nur in den seltensten Fällen vorgenommen werden und somit in Bezug auf die Themenstellung sprachbedingt zu Verwirrungen führen dürften. Sprachlich individuell angewendet gibt es auf der Seite der Ingenieure drei genormte Definitionen.

Laut DIN 69901-5 umfasst das Pflichtenheft die „vom Auftragnehmer erarbeiteten Realisierungsvorgaben aufgrund der Umsetzung des vom Auftraggeber vorgegebenen Lastenheftes“. Nach VDI-Richtlinie 2519 Blatt 1 ist das Pflichtenheft die Beschreibung der Realisierung aller Kundenanforderungen, die im Lastenheft gefordert werden. Das Lastenheft beschreibt gemäß DIN 69901-5 bzw. VDI/VDE 3694 die „vom Auftraggeber festgelegte Gesamtheit der Forderungen an die Lieferungen und Leistungen eines Auftragnehmers innerhalb eines Auftrages“. Betrachten wir die VDI 2221 kommt der Begriff Anforderungsliste hinzu.

## 5 Sprachunifizierung im Projekt

Ausgehend vom Wunsch, ein sprachliches Wirrwarr zu reduzieren, sollte bei der Vorbereitung von Projekten in Ergänzung zur Abbildung 7 ein Punkt „Sprachabgleich“ eingebunden werden. Es ist jedoch nicht ratsam, für das Projekt eine neue Sprache zu generieren. Das verwendete Vokabular sollte erfasst und zur Steigerung des Verständnisses für jeden Projektteilnehmer einsehbar dargestellt werden. Abbildung 10 zeigt hierzu ein einfach zusammengeordnetes Dokument, wo die jeweiligen Vorgehensweisen gegenübergestellt worden sind. Abbildung 11 stellt ein zusätzliches Projektpapier dar, in dem die Frage der Anforderungsliste definiert wird. Beide Papiere müssten noch weiter untersetzt und verfeinert werden. Verantwortung für den sprachlichen Abgleich hat wie zuvor der Projektleiter.

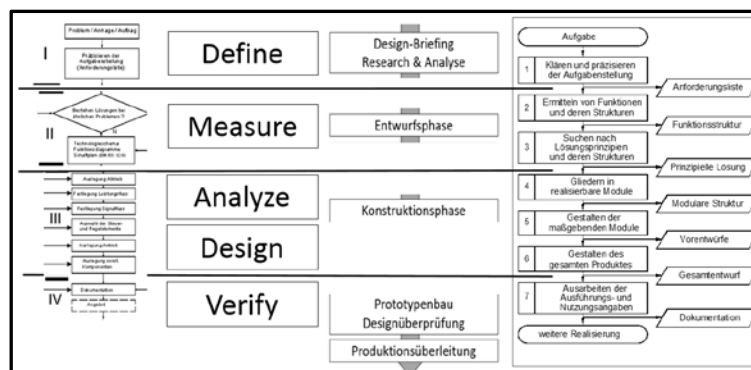


Abbildung 10: Vergleichspapier Methodenkompetenz

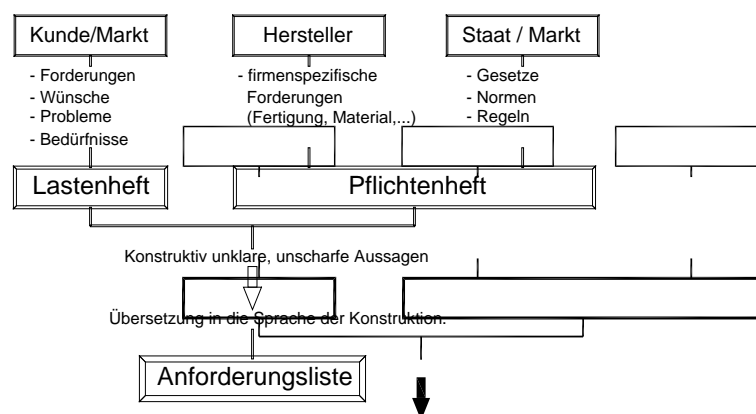


Abbildung 11: Systematisierung von Produktdefinitionsunterlagen

## Literatur

- [1] Schnegas, Henrik: Konstruktionsmethodik / Projektmanagement, HSW, 2013.
- [2] DIN 69901:2009-05 „Projektmanagement; Projektmanagementsysteme-Begriffe“, 2009.
- [3] DIN 69900:2009-01 „Projektmanagement; Netzplantechnik; Beschreibungen und Begriffe“, 2009.

## **Ansatz zur situations- und bedarfsgerechten Methodenauswahl in der Produktentstehung basierend auf dem Systemtripel aus Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem**

**Albert Albers, Benjamin Walter, Bartosz Gladysz, Nicolas Reiß, Matthias Dörr,  
Maxe Hinkelmann**

Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kaiserstr. 10, 76131 Karlsruhe

Email: benjamin.walter@kit.edu; Internet: <http://www.ipek.kit.edu>

**Inhalt:** *Angesichts der zunehmenden Anzahl unterstützender Methoden in Produktentstehungsprozessen gewinnt die Aufgabe, diese Methoden situations- und bedarfsgerecht auszuwählen, zunehmend an Bedeutung. Der vorliegende Beitrag greift bestehende Ansätze auf und erweitert den Ansatz der situationsgerechten Methodenauswahl um den Aspekt der bedarfsgerechten Methodenauswahl. Dazu stellt es praxisrelevante Kriterien der Methodenauswahl strukturiert dar und ordnet sie dem Systemtripel aus Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem zu. In enger Zusammenarbeit mit Industriepartnern wurden ein Workshop-Konzept und eine virtuelle App entwickelt, die dieses theoretische Framework nutzen und damit für die Praxis der Produktentwicklung zur Verfügung stellen.*

**Abstract:** *Due to the increasing number of methods in product engineering the task to choose the right method according to the characteristics of the situation and the demand of the product engineer gains increasingly in importance. This paper refers to existing approaches and refines them meeting the characteristics of the situation and the demand of the product engineer. For that purpose it structures the criteria of choosing methods and assigns them to the system of objectives, the operation system and the system of objects. In order to provide this theoretical framework to product engineer a workshop concept and a virtual application for mobile devices have been developed.*

**Stichwörter:** *Methodenauswahl, Methodenempfehlung, Produktentwicklung, Produktentstehung, Produktentwicklungsmethoden, Produktentstehungsmethoden, ZHO, Zielsystem, Handlungssystem, Objektsystem, Kongruenzfaktor,*

**Keywords:** *choice of methods, recommendation of methods, product development, methods of product development, system of objectives, operation system, system of objects, factor of congruence*

## **1 Motivation und Zielsetzung**

### **1.1 Anwendung und Auswahl von Methoden in der Praxis der Produktentwicklung**

In der Praxis der Produktentwicklung stellen die Auswahl und der Einsatz geeigneter Methoden die Anwender immer wieder vor Probleme. Zum einen fehlt es den Anwendern und Verantwortlichen häufig an fundiertem Methodenwissen [1]. Zum anderen ist ihnen meist nur eine geringe Anzahl an Methoden bekannt [2]. Methoden werden darüber hinaus oft nur unbewusst oder bruchstückhaft verwendet, was die Bewertung der Eignung einer Methode für einen Anwendungsfall und damit die Optimierung des Methodeneinsatzes zusätzlich erschwert. In der Praxis resultieren die genannten Probleme entsprechend häufig in der Auswahl unpassender Methoden und damit ineffizientem Methodeneinsatz, was letztlich bei einigen Anwendern zu einer generell ablehnenden Haltung gegenüber dem Einsatz von Methoden führt [3].

### **1.2 Das Forschungsvorhaben IN<sup>2</sup> - von der Information zur Innovation**

Um Unternehmen bei der Entwicklung innovativer Produkte zu unterstützen, initiierte das Bundesministerium für Bildung und Forschung das Verbundprojekt „IN<sup>2</sup> - von der Information zur Innovation“ [4]. Ziel des Projekts ist die Unterstützung der systematischen Entwicklung von Innovationen durch die gezielte Kombination von Prozess-, Methoden- und Wissensmanagement. Aufgrund einer Vorstudie bei Industriepartnern konnte nachgewiesen werden, dass viele Entwicklungsaktivitäten bisher kaum methodisch oder mit Hilfe von Werkzeugen unterstützt werden [2]. Darüber hinaus wurde im Rahmen des Projekts eine empirische Studie mit 230 berufserfahrenen Ingenieuren durchgeführt. Wesentliches Ergebnis war, dass Methoden in Unternehmen zwar eingesetzt werden, sich viele Anwender aber meist auf die ihnen bekanntesten Methoden beschränken, obwohl diese nicht besser bewertet werden als seltener eingesetzte Methoden [5]. Dies bestärkt den Bedarf nach einer situations- und bedarfsgerechten Methodenauswahl.

## **2 Stand der Forschung**

### **2.1 Methoden in der Produktentwicklung**

Der Begriff Methode beschreibt nach der VDI 2223 [6] ein planmäßiges Vorgehen zum Erreichen eines definierten Ziels. Methoden können somit als operationale Elemente aufgefasst werden, die die Vorgehensweise beschreiben, um ein gegebenes Problem Schritt für Schritt zu lösen [7]. Um Anwender in Produktentwicklungsprojekten bei der Erfüllung der jeweiligen Anforderungen zu unterstützen, werden Methoden eingesetzt, die zur Verbesserung des Produktes und Produktentstehungsprozesses in mindestens einer der Dimensionen Entwicklungszeit, Kosten und Qualität führen [8]. Indem Methoden Handlungsschritte nach bestimmten Mustern vereinheitlichen [9], können sie den Entwicklungsablauf in mehrfacher Hinsicht unterstützen. Zum einen bewirkt der Einsatz geeigneter Methoden die Strukturierung einzelner Aktivitäten in der Produktentwicklung, wodurch die jeweiligen Ergebnisse nachvollziehbarer werden. Zum anderen schafft der Einsatz geeigneter Methoden Transparenz in übergeordneten Projektstrukturen und unterstützt damit die Planbarkeit und Koordination von Aktivitäten in der Produktentwicklung [10].

### **2.2 Zielkriterien des Methodeneinsatzes**

Jede Aktivität der Produktentstehung verfolgt bestimmte Ziele. Methoden sind Hilfsmittel, die diese Zielerreichung unterstützen [7]. Entsprechend muss der Methodeneinsatz jeweils aufgabenspezifisch abgestimmt werden [11]. Die Vielzahl von Methoden in der Produktentwicklung lassen sich hinsichtlich der Ziele gliedern, deren Erreichung sie unterstützen. Diese Zielkriterien des Methodeneinsatzes sind im Bereich der Konstruktionsmethodik [12], der methodenunabhängigen Zielsetzung der Produktentwicklung [13] und der Geschäftsprozessoptimierung [14] zu finden. Zielkriterien sind beispielsweise die Senkung der Instandhaltungskosten [15] oder die Senkung der Ausschusskosten [16], wobei sich jede Methode der Produktentwicklung unterschiedlich gut für die Erreichung dieser Ziele eignen kann.

### **2.3 Mechanismen und Modelle der Methodenauswahl**

Die Auswahl geeigneter Methoden ist für das Erreichen der Zielsetzung des Methodeneinsatzes von zentraler Bedeutung. Die Gestaltung des Auswahlprozesses von Me-

thoden ist daher Inhalt zahlreicher Arbeiten [12]. Die zur Verfügung stehenden Auswahlmechanismen lassen sich in drei Kategorien gliedern [17].

Der *methodenordnende Mechanismus* basiert auf der Einordnung und Auswahl von Methoden in Kategorien anhand von Charakteristika. Er stellt die Grundlage für Methodenbaukästen, wie den *Methodenbaukasten von Ehrlenspiel* dar.

Der *methodencharakterisierende Mechanismus* beschreibt Methoden durch Charakteristika, ohne diese in Kategorien zu ordnen. Für die Auswahl einer Methode wird hier die Eignung aller Charakteristika bewertet. *Birkhofers Prozessorientiertes Methodenmodell (PoMM)* stellt einen Vertreter dieser Gruppe dar und umfasst sämtliche Charakteristika zur Beschreibung einer Methode. Es kann so als Grundkatalog aller Charakteristika für die Auswahl von Methoden verstanden werden [18].

Mit dem *Elementarmethodischen Mechanismus* werden Methoden in Elementartätigkeiten zerlegt und ihre Eignung auf dieser Basis überprüft.

## **2.4 Systemtheoretischer Ansatz zur Methodenauswahl**

Um einen möglichst ganzheitlichen Betrachtung aller relevanten Aspekte bei der Methodenauswahl zu ermöglichen, wurde ein systemtheoretischer Ansatz auf Basis des ZHO-Modells [12, 19] gewählt. Das ZHO-Modell besteht aus Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem und dient als Grundlage für das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) [20, 21]. Das iPeM unterteilt das Handlungssystem in das Aktivitätensystem und das Ressourcensystem. Das Ressourcensystem umfasst sämtliche Ressourcen, sowohl materielle als auch immaterielle, die notwendig sind um die entsprechenden Aktivitäten der Produktentstehung und Problemlösung durchzuführen.

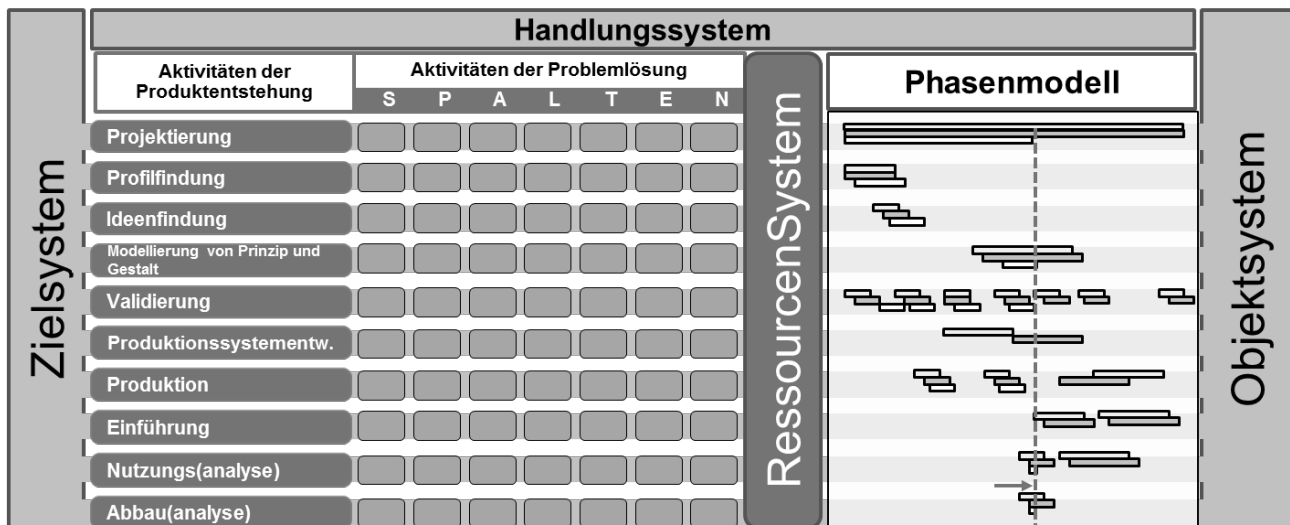


Abbildung 1: Integriertes Produktentstehungsmodell [20]

Das *iPeM*, dargestellt in Abbildung 1, spezifiziert das Aktivitätensystem durch zwei Dimensionen: Die Aktivitäten der Produktentstehung und die Aktivitäten der Problemlösung. Die Aktivitäten der Produktentstehung orientieren sich am Lebenszyklus eines Produktes und umfassen die in der Abbildung dargestellten Phasen. Die Aktivitäten der Problemlösung beschreiben den *SPALTEN*-Prozess, einer allgemein anwendbaren Methode zur systematischen Lösung von Problemen. So wird der Produktentstehungsprozess durch die beiden beschriebenen Dimensionen in 70 Abschnitte, sogenannte *Kacheln*, gegliedert.

### 3 Methodik

#### 3.1 Systematik der Zuordnung von Auswahlkriterien

Zur Unterstützung der situations- und bedarfsgerechten Auswahl von Methoden in der Produktentstehung wurden im Rahmen des Projektes IN<sup>2</sup> Auswahlkriterien erfasst und den Dimensionen des ZHO-Modells zugeordnet. Auf diese Weise sollte die Eignung von Methoden zur Erreichung spezifischer Ziele in der Produktentwicklung (Zielsystem), die Eignung für gewisse Aktivitäten der Produktentstehung und Problemlösung inklusive der erforderlichen Ressourcen (Handlungssystem) sowie die Eignung von Methoden zur Erarbeitung bestimmter Wissensobjekte (Objektsystem) sichergestellt werden. In enger Zusammenarbeit mit den Industriepartnern im Projekt IN<sup>2</sup> wurden die in Frage kommenden

Auswahlkriterien priorisiert und nur diejenigen ausgewählt, die für die Unterstützung der Methodenauswahl die höchste Relevanz besitzen.

### 3.2 Kriterien des Zielsystems

Um eine möglichst fundierte Basis für Zielkriterien der Methodenauswahl zu erarbeiten, wurden neben den Auswahlkriterien des Methodeneinsatzes [9, 11] und der Konstruktionsmethodik im engeren Sinne [7] auch die Bereiche der Produktentstehung [13] und der Geschäftsprozessoptimierung [14] betrachtet. Die auf dieser Grundlage identifizierten Auswahlkriterien wurden zu sieben übergeordneten Zielkriterien zusammengefasst, um alle relevanten Aspekte des Zielsystems zu berücksichtigen und gleichzeitig die kleinstmögliche Zahl an Clustern zu erhalten.

Die ermittelten sieben Zielkriterien sind: *Senkung der Entwicklungszeit, Kostenreduktion, Erhöhung des Innovationsgrades, Senkung der Fehlertoleranz, Verbesserung der funktionsorientierten Entwicklung, Optimierung hinsichtlich Prozessoptimierung und fachübergreifender Zusammenarbeit* und der *Erkenntnisgewinn der involvierten Personen* im Sinne des Lernprozesses der Anwender. Um die Praxistauglichkeit der ermittelten Zielkriterien sicherzustellen, wurden diese in einem Workshop mit einem Industriepartner des Projektes IN<sup>2</sup> erprobt.

### 3.3 Kriterien des Ressourcensystems

Für die Spezifizierung des Ressourcensystems wurden die im *PoMM* beschriebenen Kriterien zur Charakterisierung einer Methode als Ausgangspunkt verwendet. Der auf diese Weise erhaltene Pool wurde im Rahmen von sechs Experteninterviews konkretisiert und im Hinblick auf die für die Methodenauswahl relevantesten Kriterien reduziert. Als Resultat ergeben sich die fünf Kriterien: *Anzahl der Mitarbeiter, Art der benötigten Infrastruktur, Position der benötigten Mitarbeiter, Durchführungszeit* und die *für Vor- und Nachbereitung benötigte Zeit*.

### 3.4 Kriterien des Objektsystems

Im Rahmen einer Prozesserhebung bei den Industriepartnern im Projekt IN<sup>2</sup> wurden die wichtigsten Wissensflüsse in der Produktentstehungsphase aufgezeichnet. In diesem Zuge wurde auch die Art des jeweils zum Informationstransfer verwendeten Wissensob-



jektes erfasst. Diese umfassen unter anderem Dokumententypen und –vorlagen unterschiedlichster Art. Aber auch Prototypen werden als Wissensobjekte angesehen, da sie in gewisser Weise das Wissen repräsentieren, das zu ihrer Erstellung notwendig war. Im Rahmen der Analyse der Wissensflüsse konnten 43 unterschiedliche Wissensobjektklassen identifiziert werden. Diese wurden zu 12 Gruppen zusammengeführt, um sie für situations- und bedarfsgerechte Methodenempfehlungen strukturiert zur Verfügung zu stellen (vgl. Abbildung 2).



Abbildung 2: System zur Methodenauswahl in Anlehnung an das iPeM

## 4 Situations- und bedarfsgerechte Methodenauswahl

Um die Auswahl von Methoden in der Produktentstehung situations- und bedarfsgerecht zu unterstützen, wurden zwei Konzepte entwickelt, die die oben dargestellten Erkenntnisse für die Praxis der Produktentstehung bestmöglich nutzbar machen sollen. Zum einen handelt es sich dabei um moderierte Workshops, zum anderen um die Entwicklung einer virtuellen App für mobile Endgeräte. Beide Konzepte werden zunächst vorgestellt und im Anschluss hinsichtlich ihrer Stärken und Schwächen verglichen.

### 4.1 Workshop-basierte Methodenauswahl

Im Workshop wurde ein excel-basiertes Tool eingesetzt, in dem die Zuordnung der Methoden zu den iPeM-Aktivitäten (Aktivitätensystem), sowie die Eignung der Methoden in Hinblick auf verfügbare Kapazitäten (Ressourcensystem) und Zielsetzung (Zielsystem) hinterlegt ist. Unterstützt durch die Moderation wurden von den Workshop-Teilnehmern die einzelnen Prozessaktivitäten, die durch den Methodeneinsatz unterstützt werden sollen, identifiziert und in iPeM-Aktivitäten überführt. Durch eine Auswahl der zu betrachtenden

Aktivitäten und eine Relevanzbewertung der Zielkriterien und Kapazitäten durch die Workshop-Teilnehmer wurde eine geeignete Methodenauswahl getroffen. Die Methodenauswahl wurde auf Basis eines Portfolio-Diagramms (Erfüllungsgrad der Zielsetzung vs. Erfüllungsgrad der Kapazitätsanforderungen) diskutiert. Mit Hilfe der Visualisierung der Methodeneignung im Portfolio-Diagramm konnte die Methodenauswahl im Workshop deutlich erleichtert werden, da die relativen Vor- und Nachteile der Methoden auf einem Blick ersichtlich sind.

## 4.2 App-basierte Methodenauswahl

Im Zuge des Projektes IN<sup>2</sup> wurde außerdem eine virtuelle App, der so genannte *Innofox*, zur Unterstützung der situations- und bedarfsgerechten Methodenauswahl entwickelt.

Der Kern der App ist ein Algorithmus, der auf der Grundlage von Anforderungen und Restriktionen des jeweiligen Anwenders für jede Methode aus der hinterlegten Methodendatenbank einen Kongruenzwert errechnet und darauf aufbauend ein Ranking der zur Verfügung stehenden Methoden ausgibt. Der Algorithmus stützt sich dabei auf die oben dargestellten Kriterien aus Ziel-, Handlungs- und Objektsystem und verknüpft diese im Rahmen einer Nutzwertanalyse. Der Kongruenzwert errechnet sich dabei wie folgt:

$$\text{Kongruenzwert einer Methode} = \text{ZS} * \text{OS} * (\text{w1} * \text{RS} + \text{w2} * \text{AS})$$

Faktoren bei der Errechnung des Kongruenzwertes sind zunächst das Zielsystem (ZS) und das Objektsystem (OS), welche als K.O.-Kriterien betrachtet werden. Dies bedeutet, dass eine Methode das vom Anwender geforderte Zielkriterium respektive das vom Anwender angestrebte Wissensobjekt entweder unterstützt oder nicht unterstützt. Sofern die Unterstützung vorliegt, nehmen die Variablen ZS und OS den Wert 1 ein, ansonsten 0. Von der partiellen Unterstützung dieser Kriterien wurde im Rahmen der Entwicklung der App abgesehen. Die Werte des Ressourcensystems (RS) und Aktivitätensystems (AS), werden als „weiche“ Kriterien aufgefasst, weswegen ihre Werte zwischen 0 und 1 liegen. Partielle Eignung von Methoden auf die Ressourcenausstattung respektive die anstehende Aktivität in der Produktentwicklung wird also explizit zugelassen. RS und AS ergeben sich dabei jeweils durch den Vergleich der Kriterien im Ressourcensystem und Aktivitätensystem, wobei die jeweils sich ergebenden Werte mit empirisch ermittelten Faktoren ge-

wichtet werden. Die Parameter  $w_1$  und  $w_2$  gewichten wiederum das Ressourcensystem und das Aktivitätensystem gegeneinander und wurden im Rahmen von sechs Interviews mit Praxispartnern empirisch bestimmt.

### 4.3 Vergleich von moderiertem Workshop und virtueller App

Im Rahmen der Entwicklung und Durchführung der Workshops zur Methodenauswahl fiel auf, dass in der Praxis nicht immer vollständige Klarheit und Einigkeit hinsichtlich der zu erreichenden Ziele bestand. Außerdem fehlte an einigen Stellen das notwendige Fachwissen, um eine fundierte Methodenauswahl zu treffen. An dieser Stelle kann in moderierten Workshops durch die Zuhilfenahme der Expertise eines geeigneten Moderators das Zielsystem qualifiziert weiterentwickelt werden. Es ist jedoch darauf zu achten, dass der eingesetzte Moderator sowohl ausreichendes Fach- als auch Methodenwissen besitzt, um diesen Prozess optimal begleiten und die anstehenden Aktivitäten adäquat den iPeM-Aktivitäten zuordnen zu können. Es ist jeweils darauf zu achten, dass die Einflussnahme des Moderators auf den Verlauf und die Ergebnisse der Workshops kritisch hinterfragt wird.

Im Vergleich zu den Workshops zur Methodenauswahl ist die App-basierte Methodenauswahl von der Einflussnahme eines Moderators unabhängig. Die Installation und Nutzung der App ist auf marktüblichen mobilen Endgeräten problemlos möglich. Der finanzielle und zeitliche Aufwand für die Nutzung der App ist im Vergleich zur Durchführung eines Workshops als deutlich geringer einzuschätzen. Die Nutzung der App kann zeitlich flexibel und kurzfristig erfolgen und setzt auf Seiten des Anwenders weniger Fachwissen voraus als die Teilnahme an einem moderierten Workshop. Die in die App integrierten Methodensteckbriefe stellen eine zusätzliche Unterstützung des Anwenders bei der Auswahl geeigneter Methoden zur Verfügung. Durch die Überführung der Situation der Produktentwicklung, in der sich der Anwender der App befindet, in das Aktivitätssystem des iPeM kann im günstigen Fall das Situationsbewusstsein des Anwenders verbessert werden. Allerdings kann durch eine fehlerhafte Zuordnung auch eine unbemerkte Verfälschung der vom Innofox vorgeschlagenen Methodenempfehlung verursacht werden, die ein Moderator im Rahmen eines Workshops abfangen könnte. Ähnliches gilt für die Kriterien des Zielsystems. Sofern die angestrebten Ziele bekannt sind und mit Hilfe der in der App angebotenen Kriterien des Zielsystems problemlos abgebildet werden können, kann eine zeitspa-

rende Zuordnung vorgenommen werden, die unter Umständen sogar das Zielbewusstsein des Anwenders erweitert. Gelingt dies jedoch nicht, sind die aufgrund der fehlerhaften Informationsbasis von der App empfohlenen Methoden möglicherweise nur zu einem geringeren Grad situations- und bedarfsgerecht.

## **5 Zusammenfassung und Ausblick**

Der Vergleich der Workshop-basierten Methodenauswahl mit der App-basierten Methodenauswahl zeigt, dass je nach Anwendungsfall unterschiedliche Unterstützungen bei der Methodenauswahl zielführend sind. So ist im Falle eines nicht vollständig geklärten Ziel- und Ressourcensystem eine Workshop-basierte Methodenauswahl, die die Methodenzuordnung übernimmt, besser geeignet als eine voll-automatisierte Lösung mit einer App. Dagegen kann bei einer klaren Definition von Ziel- und Ressourcensystem, die voll-automatisierte Lösung effizienter sein. Dies erfordert eine flexible Software-Unterstützung, die der Innofox bietet. Dieser ermöglicht neben der Methodenauswahl, die auf Auswahlkriterien aus Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem zurückgreift, auch die Betrachtung des gesamten digitalen Methodenkatalogs und ermöglicht dadurch zusätzlich die erfahrungsbasierte Methodenauswahl.

Im Rahmen des studentischen Projektes „Integrierte Produktentwicklung“ mit 42 Probanden soll in einem nächsten Schritt der Innofox und das Workshopkonzept über die Zeitdauer von vier Monaten validiert werden. Zielsetzung im Rahmen des Projektes ist es, eine Produktentwicklungsaufgabe eines Industrieunternehmens zu bearbeiten und hierbei die Aktivitäten der Produktentstehung bis hin zur Erstellung eines Prototyps zu durchlaufen. Der Innofox und das Workshopkonzept sollen dabei einen wesentlichen Beitrag bei der situations- und bedarfsgerechten Auswahl von Methoden in den zu durchlaufenden Aktivitäten der Produktentstehung leisten.

## **6 Literatur**

- [1] Reinicke, Tamara: Möglichkeiten und Grenzen der Nutzerintegration in der Produktentwicklung. Dissertation, Technischen Universität Berlin. Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme, 2004.
- [2] Albert, Albers, Lüdcke, Robert, Bursac, Nikola, & Reiß, Nicolas. Connecting knowledge-management-systems to improve a continuous flow of knowledge in engineering design processes. In Z. R. I. Horváth (Ed.), Proceedings of TMCE 2014 (Vol. 1, pp. 393–402). I. Horváth, Z. Rusák, 2014

- 
- [3] Jänsch, Judith: Akzeptanz und Anwendung von Konstruktionsmethoden im industriellen Einsatz. Analyse und Empfehlungen aus kognitionswissenschaftlicher Sicht. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Berichte aus dem Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente der TU Darmstadt, 396), 2007.
  - [4] [www.in2-projekt.de](http://www.in2-projekt.de)
  - [5] Albers, Albert., Reiß, Nicolas., Bursac Nikola., Urbanec Jan, Lüdcke Robert. Situation-appropriate method selection in product development process – empirical study of method application. Proceedings of Nord Design 2014 (im Druck), 2014
  - [6] VDI-Richtlinie 2223: Methodisches Entwerfen technischer Produkte, 1999.
  - [7] Lindemann, Udo: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. In: Methodische Entwicklung technischer Produkte, 2009.
  - [8] Schneider, Michael: Methodeneinsatz in der Produktentwicklungs-Praxis. Empirische Analyse, Modellierung, Optimierung und Erprobung. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik, Maschinenelemente, 346), 2001.
  - [9] VDI-Richtlinie 2222: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, 1997.
  - [10] Graner, Marc: Der Einsatz von Methoden in Produktentwicklungsprojekten. Eine empirische Untersuchung der Rahmenbedingungen und Auswirkungen. Wiesbaden: Springer Fachmedien (Schriften zum europäischen Management), 2013.
  - [11] Braun, Thomas: Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld. Dissertation. Technischen Universität München, 2005.
  - [12] Albers, Albert, Lohmeyer, Quentin, Ebel, Björn: Dimensions of objectives in interdisciplinary product development projects. In 18th International Conference on Engineering Design ICED 11, Copenhagen, Denmark (Vol. 2, pp. 256–265), 2011.
  - [13] Ehrlenspiel, Klaus; Meerkamm, Harald: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. In: Integrierte Produktentwicklung, 2013.
  - [14] Schmelzer, Hermann J.; Sesselmann, Wolfgang: Geschäftsprozessmanagement in der Praxis. Kunden zufriedenstellen, Produktivität steigern, Wert erhöhen ; [das Standardwerk]. 8., überarb. und erw. Aufl. München: Hanser, 2013.
  - [15] Ehrlenspiel, Klaus; Kiewert, Alfons; Lindemann, Udo; Mörtl, Markus: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. In: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, 2014.
  - [16] Bergsmann, Stefan: End-to-End-Geschäftsprozessmanagement. Organisationselement - Integrationsinstrument - Managementansatz. In: End-to-end Geschäftsprozessmanagement, 2011.
  - [17] Braun, Thomas; Lindemann, Udo: Supporting the Selection, Adaptation and Application of methods in Product Development. In: Folkesson, A.; Gralén, K.; Norell, M.; Sellgren, U. (Eds.): Proceedings of the 14th International Conference on Engineering Design 2003 (ICED 03), August 19.-21. 2003. Stockholm: Design Society, 2003.
  - [18] [Birkhofer et al. 2002] Birkhofer, H.: Cleaning up Design Methods. In: International Design Conference Design 2002, Dubrovnik, 2002

- [19] Ropohl, Günter: Einleitung in die Systemtechnik. In Systemtechnik – Grundlagen und Anwendung (pp. 1–77). München Wien: Carl Hanser Verlag, 1975.
- [20] Albers, Albert, Braun, Andreas. A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes. IJPD, 15(1/2/3), 6–25, 2011.
- [21] Braun, Andreas: Modellbasierte Unterstützung der Produktentwicklung – Potentiale der Modellierung von Produktentstehungsprozessen am Beispiel des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Institut für Produktentwicklung, 2013.

## Effective Role of Vendor's Selection in Product Development Industries

Iliyas Raza\*, Muhammad Shafique, and Jörg Feldhusen

\*Institute of Engineering Design (IKT), RWTH Aachen University  
Steinbach Str.54 B, 52074 Aachen, Germany

E-Mail: [iktpost@ikt.rwth-aachen.de](mailto:iktpost@ikt.rwth-aachen.de); Internet: <http://www.ikt.rwth-aachen.de>

\*E-Mail: [raza@ikt.rwth-aachen.de](mailto:raza@ikt.rwth-aachen.de)

**Abstract:** *The scope of this study is to evaluate the performance of the vendors involved in manufacturing of mechanical parts used in assemblies at the product development organization. The performance data of vendors in the form of non-conformances (NCs) was collected from product Planning and Quality Control Department and it was analyzed for different factors like rejection rate, rework and delayed deliveries. The shortcomings of existing vendor evaluation procedure such as non-quantification of vendor capabilities, lack of feedback to vendors, non-monitoring of vendors' operator and equipment's performance and risk management were addressed in this study. A comprehensive plan was proposed to assess the technical capabilities of the vendors that returned measurable attributes. In the study, a feedback mechanism was adopted to share vendor evaluation output with the vendors. The feedback to the vendors not only completed the communication link between vendor and the user, but also it helped vendors improve their processes. Another significant contribution of this study is employment of Measurement System Analysis (MSA). MSA tools linearity and Bias study Gauge R&R (crossed) were employed to assess their measurement tools and operator's training. Major problems identified during the study were; untrained labor and below standard measurement tools.*

*The effectiveness of the proposed vendor selection guidelines was measured through data analysis after implementation of the guidelines. The proposed technical evaluation led to more vigilant assessment that eliminated the previously top ranked vendors. The inclusion of new vendors as per selected guidelines resulted in improvement in terms of rejection rate, delays, and rework of developed components.*

**Keywords:** *Product Development, Vendors, MSA, Gauge R & R, Rejection Rate*

### 1. Introduction

In current era, cost competitiveness with good quality is the foremost requirement to survive in the dynamic market. To achieve the objective, reduction in rejection rates, timely deliveries and pragmatic quality control processes are cornerstones. In order to ensure better quality of the product, the vendor selection is one of the most important processes. The performance of a company is highly dependent on the performance of its vendors and

sub-contractors. Each company or firm is required to implement sophisticated vendor selection procedures. Therefore, vendor evaluation and selection has become a key process in today's all types of firms [1]. To guarantee timely delivery of product with greater yield, it is required to assess vendors on the basis of more realistic parameters. These parameters are required to be objective-oriented and quantifiable. The parameters used to evaluate vendors affect significantly selection of vendors and may result in loss in project in terms of finances and quality [2].

A number of schemes have been proposed for vendor evaluation such as questionnaire base vendor evaluation technique, statistical techniques, balanced scorecard model (BSC), corporate social responsibility (CSR) and combination of BSC and CSR. In most of the current vendor evaluation, all evaluation parameters are not quantifiable. This flaw leads to sort of subjective evaluation. Similarly, statistical techniques do not address all the capabilities of the vendors in totality [3, 4]. The existing vendor evaluation techniques overlook several factors, which are important for a dynamic manufacturing industry.

## **2. Problem Statement**

Inappropriate selection method of vendors can cause poor quality and time delay. Due to poor evaluation methods, it is very difficult to manage important part of the business including product quality, product planning, purchasing, managing inventories, interaction with different vendors and suppliers and tracking orders etc. The current vendor evaluation methods lack several aspects; quantifiable evaluation parameters, feedback to vendors, measurement system analysis (MSA) of vendors and risk assessment and management capability of vendors. The vendor's selection guidelines on the basis of quantifiable evaluation parameters and MSA would be an important contribution towards timely completion of projects without compromising on quality.

## **3. Objectives of Present Study**

The main objective of this study is to ensure a company's product development and service quality. Objectives are highly correlated with constraints such as permanent cost reduction and maintenance of competitive advantages. Vendor selection and evaluation is one of the most important tasks in company's performance. Study addressed the following

- a). Define performance parameters of vendors that can be qualified
- b). Propose a mechanism for providing feedback to vendors based on their performance of



previous work

- c). Implement measurement system analysis tools to monitor vendors' measurement capability for mechanical components
- d). Incorporate vendors' risk management ability into the selection and evaluation system
- e). Implement (a) to (d) into the vendor evaluation and carryout analysis of data obtained with vendors selected on the basis of new guidelines.

## 4. Data Collection and Analysis

### 4.1 Research Methodologie

Various vendor evaluation and selection techniques have been discussed .Any model cannot be applied to each organization. The selection of vendor evaluation technique would depend upon nature of work, organizational culture, inter-organization partnership/relationships, work environment and governmental rules and regulation and etc. In order to devise an appropriate model, thorough study of the existing system is a paramount requirement. This thesis adopted a hybrid technique to determine pragmatic and efficient vendor selection guidelines. A hybrid approach has been worked out to reach the vendor selection method. In this approach, a gaps identification and subsequent removal were carried out through application of statistical tools. The hybridization of these methods would help attain continual improvements in the manufacturing process and would result in elimination of any poor performer without sabotaging production targets.

In this Chapter, the research hierarchy has been discussed, starting from the collection of data with existing vendor selection procedure up to the formulation of proposed research guidelines.

### 4.2 Research Hierarchy

In order to assess the existing vendor evaluation method, and propose the selection following research methodology was adopted

- **First step:** five vendors for mechanical manufacturing were selected
- **Second Step:** jobs given to them through work orders during last one year were analyzed with respect to following
- **Third Step:** Statistical analysis were carried out to quantify the performance of

existing system In order to integrate statistical tool into the research methodology, the data was acquired of the jobs given to selected vendors. The data of the pre-defined parameters given in Step 2 are recorded over a specified time period. Then statistical analysis of

the data was carried out to quantify the performance of the vendors.

- **Fourth Step:** Performed gap analysis of existing procedure and chalked down strategy for modification of vendor evaluation scheme
- **Fifth Step:** Implemented the proposed scheme for about 9 months and collected the data
- **Sixth Step:** Compared with previous data and recorded the improvement in the vendor selection procedure.

#### 4.3. Data Collection

In order to analyze existing vendor selection procedure, data of top ranked five vendors A, B, C D, and E for mechanical manufacturing was collected of year 2012. Two major types of mechanical products were given to these vendors for manufacturing

**Components:** The components are more than 25 numbers of components having 07 different small sub-assemblies .The number of components and sub-assemblies manufactured by each vendor are given in Table 4.1.

Table 4.1: Items Manufactured by Vendors in Year 2012

| Type           | No. of Items Manufactured |          |          |          |          |
|----------------|---------------------------|----------|----------|----------|----------|
|                | Vendor A                  | Vendor B | Vendor C | Vendor D | Vendor E |
| Components     | 3615                      | 3481     | 3571     | 4378     | 5670     |
| Sub-assemblies | 1065                      | 1184     | 689      | 827      | 2040     |
| Total          | 4680                      | 4665     | 4260     | 5205     | 7710     |

#### 4.4. Inspection Plan

In order to inspect manufactured component/sub-assemblies, inspection plan includes measuring mechanical dimensions, surface smoothness, white stage inspection, surface treatment, visible cracks and fitment of matching parts etc. For each component, an inspection plan is prepared including measurement of critical dimensions, and other above-mentioned parameters. The product is accepted or rejected or tagged for re-work based on the outcome of the inspection parameters.

#### 4.5. Inspection Statistics

The performance of the vendors for manufacturing of components and sub-assemblies were measured in terms of rejections, rework and delivery timelines. The overall statistics of five companies is given in Table 4.2.

Table 4.2: Vendor performance for year 2012

| TYPE           | QTY   | ACCEPTANCE |          | DELIVERY STATUS |         |
|----------------|-------|------------|----------|-----------------|---------|
|                |       | Rejected   | Reworked | On Time         | Delayed |
| Components     | 20715 | 2145       | 3540     | 12600           | 8115    |
| Sub-assemblies | 5805  | 1305       | 1170     | 3630            | 2175    |
| Overall        | 26520 | 3450       | 4710     | 16230           | 10290   |
| Percentage     |       | 13.0%      | 17.80%   | 61.20%          | 38.80%  |

It can be seen that overall rejection rate is over 13%, which is quite significant. Moreover, the rework carried out during one year is 17.7% and delays were over 38.8%. The rejection rates of individual vendors were measured in percentage of their manufactured items as shown in Fig. 4.1. The rework rate of the five vendors for the same period is shown as percentage of their manufactured items in Fig. 4.2. The percentage rework is quite significant especially for vendor B, D and E. This higher percentage rework reflects serious issue in vendor selection procedure. These higher rework rates show that technical capabilities of the vendors are not being properly measured. Another parameter measured is delivery times. The number of components delayed in delivery for the vendors are recorded and shown in Fig. 4.3.

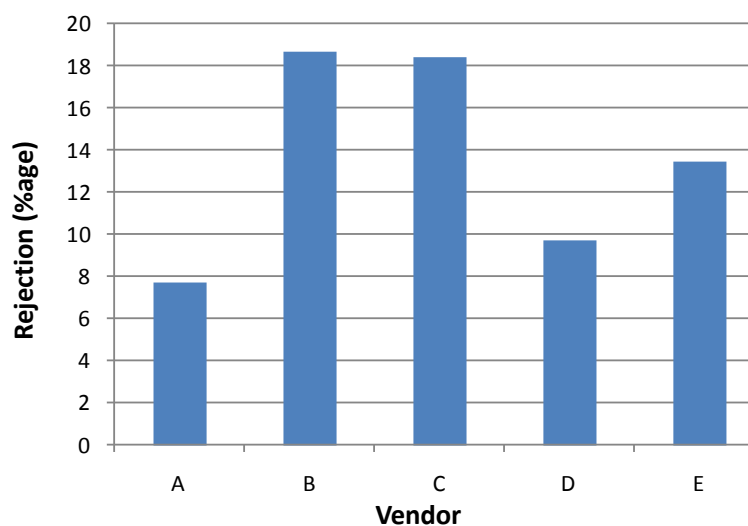


Figure 4.1: Percentage Rejection rate of vendors.

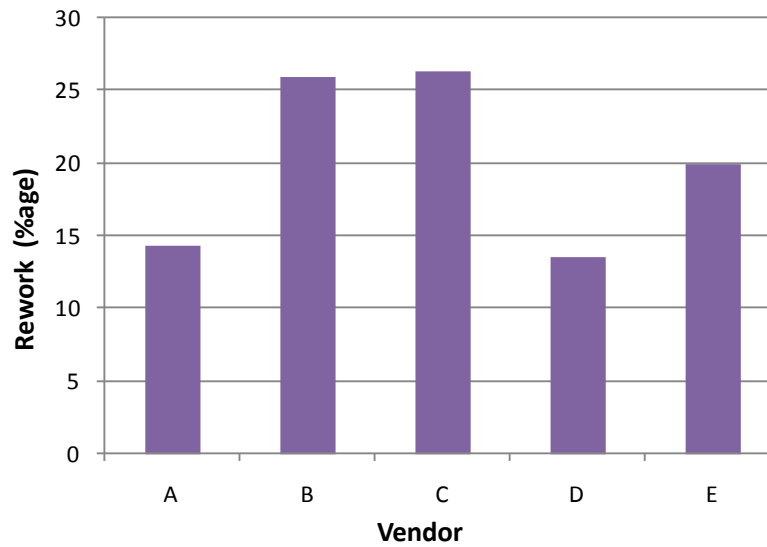


Figure 4.2: Percentage rework rate of vendors

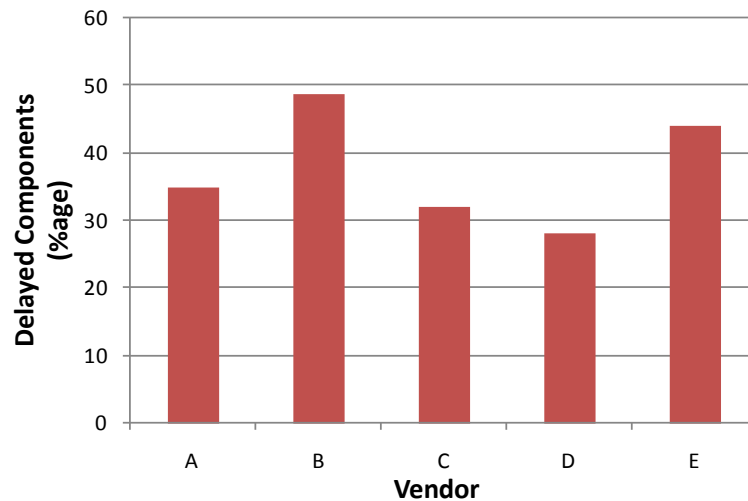


Figure 4.3: Percentage of delayed items

## 5. Results and Discussion

Based on the vendor's technical evaluation, response on feedback and the MSA, it was decided that the order for manufacturing of mechanical components be placed with Vendors "D", "G" and "H" for the year 2013.

The manufacturing data for the three selected vendors were collected for first three quarters of year 2013. The manufacturing data is for the defined time is shown in Table 5.1. During the three quarters, 19,136 components and sub-assemblies were manufactured by the three vendors. The distribution of these components and sub-assemblies among three vendors are given in Table 5.2. The performance of the vendors for manufacturing of components and sub-assemblies were measured in terms of rejections, rework

and delivery timelines. The overall statistics of five companies is given in Table 5.2 and for the year 2012 Table 4.2 is reproduced below for comparison.

Table 5.1: Vendor performance for year 2013

| TYPE           | QTY   | ACCEPTANCE |          | DELIVERY STATUS |         |
|----------------|-------|------------|----------|-----------------|---------|
|                |       | Rejected   | Reworked | On Time         | Delayed |
| Components     | 14870 | 1078       | 1579     | 11650           | 3220    |
| Sub-assemblies | 4265  | 403        | 615      | 2652            | 1613    |
| Overall        | 19135 | 1481       | 2194     | 14302           | 10290   |
| Percentage     |       | 7.75%      | 11.50%   | 74.75%          | 25.25%  |

Table 5.2: Items Manufactured by three selected vendors for year 2013

| Type           | No. of Components Manufactured by Vendors |          |          |
|----------------|---|----------|----------|
|                | Vendor D                                  | Vendor G | Vendor H |
| Components     | 5948                                      | 5205     | 3718     |
| Sub-assemblies | 1706                                      | 1066     | 1493     |
| Total          | 7654                                      | 6271     | 5211     |

Table 4.2: Vendor performance for year 2012

| TYPE           | QTY   | ACCEPTANCE |          | DELIVERY STATUS |         |
|----------------|-------|------------|----------|-----------------|---------|
|                |       | Rejected   | Reworked | On Time         | Delayed |
| Components     | 20715 | 2145       | 3540     | 12600           | 8115    |
| Sub-assemblies | 5805  | 1305       | 1170     | 3630            | 2175    |
| Overall        | 26520 | 3450       | 4710     | 16230           | 10290   |
| Percentage     |       | 13.0%      | 17.80%   | 61.20%          | 38.80%  |

In order to verify the effectiveness of vendor selection guidelines, the performance of the vendors, time and Quality are the two main indicators of a vendor's performance. In order to properly assess vendors' performance in executing the contracts, it was decided that the current performance of the vendors would be compared with its performance in year 2012. Although the number of components manufactured in these two durations i.e. year 2012 and first three quarters of year 2013 are different, but as the comparison results are given as percentage of the manufactured components, so this comparison is fair enough. The performance of the vendors is carried out in terms of time and quality as was done in Chapter 4 with the existing vendor evaluation procedure.

## 5.1 Performance in terms of quality

The performance of three vendors in terms of quality i.e. rejection rate and re-work after implementation of proposed vendor selection guidelines is shown in Fig. 6.1 and 6.2.

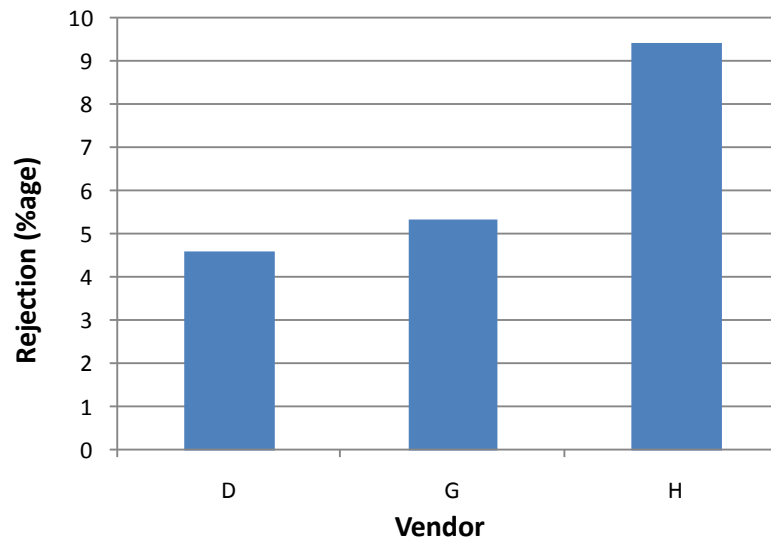


Figure 5.1: Percentage rejection rate of vendors after implementation of guidelines

From Fig. 5.1 it can be seen that quality of manufactured components has increased significantly. The vendor “D” that qualified from the previous vendor list has improved rejection rate from 10.12% to 4.62% and is steady in re-work rate. In terms of rejection rate, the performance of Vendor “D” is superior to other two vendors; whereas Vendor “H” outperformed the other vendors with respect to rate of re-work.

## 5.2 Performance in terms of time

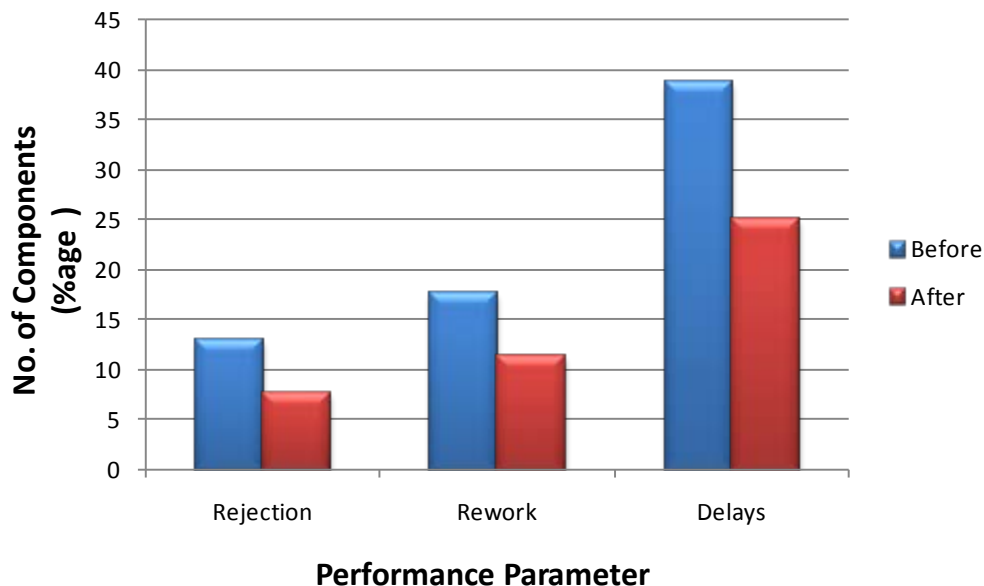


Figure 5.2: The comparison of performance parameter before and after implementation of guidelines

The delay in delivery schedule is one of the most important parameter from perspective of project management. The performance of the qualified vendors as per proposed

vendor selection guidelines is given in Fig. 5.2. The overall performance of the selected vendors has improved although there is still room for further improvement. The average delay in terms of percentage of manufactured items is about 25.25%, which is lower than previous figure. The delay would be reduced by applying iterative feedback mechanism.

The overall quantitative performance comparison of vendors before and after implementation of the proposed vendor selection guidelines is given in Fig. 5.2. It can be observed that rate of rejection has dropped from 13.0% to 7.7%. The improvement in rate of rejection is over 5%, which is quite reasonable with only one iteration of vendor evaluation and feedback. Similarly, rate of re-work has improved by more than 6%. Although it is still more than 10%, which is desired to be reduced further.

The performance of vendors in terms of time delay has improved significantly by 13.5%. Still the overall delays in percentage of the manufactured of items is about 25% which is well above desired limits. But I am confident, that the vigilant evaluation and feedback mechanism would help decrease it further.

Vendor selection is one of the most important activities considered in an organization. Traditionally, vendors are selected for their ability to meet the quality, delivery performance and price offered. Price may be not as such important where quality and delivery performance are met. In this research work, the main focus was on technical capabilities of the vendors to perform the manufacturing of mechanical components. The currently top ranked vendors were subjected to technical evaluation and risk assessment. Other out of 5 vendors, three failed to qualify for future orders. Four new vendors were invited proposals. Only two qualified and so orders for manufacturing mechanical components were forwarded to 04 vendors (02 new, 02 old). Their performance was monitored for three quarters of year 2013. The data was analyzed for three KPIs: rejection rate, rework and delayed deliveries.

- The rate of rejection dropped from 13.0% to 7.7%.
- The rework rate dropped from 17.8% to 11.5%.
- The delayed deliveries dropped from 38.8% to 25.25%.

It was the first iteration of the sort. The results are hoped to improve with further iterations.

## 6. Conclusiones

The research proposed new vendor selection guidelines. The existing vendor selection

procedure was lacking several important aspects. For instance, there were no quantifiable measures to assess technological capabilities of vendors. The technical evaluation and performance of vendors were not used to be communicated to vendors. Most importantly, the no technical tool was utilized to monitor the machine and personnel capabilities. Moreover risk assessment was not in the loop of vendor evaluation.

In this thesis, the gaps in the vendor evaluation process have been worked out. A comprehensive strategy was devised to assess the technological capabilities and risk management of vendors. The proposed strategy not only covers all aspects of the technical attributes, but also returns the quantitative measure, which enables easy comparison of vendors.

Feedback to vendors is very important in developing vendor-user partnership. In this study, a vendor feedback mechanism was adopted to ensure improvement in vendors' quality of work. The iteration of this step would keep vendors' performance on track. Another significant contribution of this work is to employ pragmatic measurement system analysis (MSA) as a tool to monitor operators and equipment performance. MSA uses statistical approach to analyze the output of a measurement system, which can identify the flaws of the system. The proposed vendor selection guidelines applied to a public sector company to evaluate vendors of mechanical manufacturing. The previous vendors of the company performed poorly with respect to quality of work and delivery times. The guidelines discovered the flaws in the system and identified the weaknesses of the selected vendors, which led to disqualification of top ranked vendors.

The vendor selected using the proposed vendor selection procedure, performed exceptionally well during the time period of application i.e. first three quarters of year 2013. The rate of rejection has improved from 13.0% to 7.7%. Similarly, the rate of re-work has improved by more than 6%. With the new vendor selection guidelines, performance in terms of delay has also enhanced. The time delay in terms of percentage of manufactured items has dropped by 13.5%, which is quite significant. It is hoped that all performance parameters would improve by continual iterations of the proposed vendor selection guidelines.

In future, feedback mechanism would be refined by interacting with various vendors. More elements/measures would be included in feedback proforma to make it more elaborate and comprehensive. Also, MSA would be applied over a wider set of observations for more reliable and realistic output.



## 7. Acknowledgement

The authors would like to gratefully acknowledge for all kinds of the supports financial as well as technical provided by IKT, Institute, RWTH Aachen University and HEC,Pakistan.

## Literatur

- [1] Gordon,S,R., "Supplier evaluation and performance excellence" a guide to meaningful metrics and successful results. J. Ross 1. Publishing. pp. 232. ISBN 978-1932159806, 2008.
- [2] Monczka,R.,M., Handfield,R.B, Giunipero.,L " Purchasing and Supply Chain Management". Cengage Learning. pp. 810. ISBN 9780324381344, 2008.
- [3] Chan, F. T. S., Chan, H. K., Ip, R. W., and Lau, H. C. W. "A Decision Support System for Supplier Selection in the Airline Industry," Journal of Engineering Manufacture, 221 Part B, 742-758,2007.
- [4] Juhnyoung,L., "Data engineering issues in e-commerce and services" Springer. pp. 290. ISBN 978-3540354409, 2006.
- [5] Gordon,S,R.,"Seven Steps to Measure Supplier Performance" ,Quality Progress, August, 2005.
- [6] Chan, F. T. S. "Interactive Selection Model for Supplier Selection Process: An Analytical Hierarchy Process Approach," International Journal Production Research, Volume 14, Number 15, 3549–3579, 2003.
- [7] Dahel, N. "Vendor Selection and Order Quantity Allocation in Volume Discount Environments." Supply Chain Management: An International Journal, Volume 8, Number 4, 334-342, 2003.
- [8] Bhutta, K. S., "Supplier Selection Problem: A Comparison of Total Cost of Ownership and Analytic Hierarchy Process Approach," Supply Chain Management: An International Journal, Volume 7, Number 3, 126-135, 2002.
- [9] Nelke.M., "Supplier Relationship Management; Advanced Vendor Evaluation for Enterprise Resource Planning Systems" MIT Management Intelligenter Technologien GmbH Pascalstrasse 69,D-52076, Aachen, Germany,2001.
- [10] Klotz.U, Nelke.M., Poloni.M., "A New Vendor Evaluation Product for SAP R/3® Systems " MIT Management Intelligenter Technologien GmbH Promenade 9,D-52076 Aachen, Germany,2000.
- [11] Klotz.U, Nelke.M., Poloni.M "A New Vendor Evaluation Product for SAP R/3 ® Systems" Session "Knowledge Discovery in Enterprise Information Management SAP R/3 ® Systems" Session" of European Symposium on Intelligent Techniques , September 14-15 ,2000, Aachen, Germany.



# Ingenieurarbeitsplatz der Zukunft: Anforderungsaufnahme, Systematisierung und Versuchsaufbau für ein Labor

Felix Schulz<sup>\*1</sup>, Konrad Exner<sup>\*2</sup>, Haygazun Hayka<sup>\*1</sup>, Rainer Stark<sup>\*1,2</sup>

<sup>\*1</sup>Geschäftsfeld Virtuelle Produktentstehung, Fraunhofer IPK

Pascalstraße 8-9, 10587 Berlin

E-Mail: felix.schulz@fraunhofer.ipk.de, haygazun.hayka@ipk.fraunhofer.de, rainer.stark@fraunhofer.ipk.de;

Internet: <http://www.ipk.fraunhofer.de>

<sup>\*2</sup>Fachgebiet für Industrielle Informationstechnik, Technische Universität Berlin

Pascalstraße 8-9, 10587 Berlin

E-Mail: konrad.exner@tu-berlin.de, rainer.stark@tu-berlin.de; Internet: <http://www.iit.tu-berlin.de>

**Inhalt:** In diesem Beitrag geht es um die Gestaltung des Ingenieurarbeitsplatzes der Zukunft. Es werden Einflussfaktoren auf Arbeitsweise verschiedener, typischer ingenieurstechnischer Arbeiten und Arbeitsweisen recherchiert, zusammengefasst und systematisiert. Hieraus resultierende Elemente einer Laborgestaltung, in dem der Einfluss neuer Technologien im Rahmen der virtuellen Produktentstehung auf das Arbeiten erprobt werden soll, werden vorgestellt.

**Abstract:** This paper deals with the design of the engineering working place of the future. Impact factors to typical engineering functioning are researched, summarized, and systematized. Results are used to design elements of an experimental laboratory for investigating the influence of new technologies on functioning in the context of virtual product creation.

**Stichwörter:** Ingenieurarbeitsplatz der Zukunft; Ingenieurarbeitsweise, Virtuelle Produktentstehung

**Keywords:** engineering working place of the future; engineering functioning; virtual product creation

## 1 Einleitung

Der Ingenieuralltag wird insbesondere vor dem Hintergrund einer zunehmenden virtuellen Produktentstehung von der Nutzung von Informationstechnik geprägt. Verwendeten Methoden und Werkzeuge sind von den Randbedingungen der damit verbundenen Technik stark beeinflusst, die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen im Bereich der Herstellung technischer Produkte, die Leistungsfähigkeit des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses, wird durch arbeitstechnische Entwicklungstrends beeinflusst [1], die Umsetzung und Anwendung der Bestandteile der Virtuellen Produktentstehung wird eine entscheidende Rolle einnehmen [2]. Bereits heute wird laut den Ergebnissen einer Studie des

Verein Deutscher Ingenieure (VDI), der CONTACT Software GmbH sowie des Fraunhofer IPK auf Grundlage einer Umfrage unter gut 1400 Ingenieuren ein Verlust an Arbeitszeit für ingenieurmäßige Kernaufgaben bemängelt [3]. Um dem Fortschreiten dieser Entwicklung gegebenenfalls entgegenzuwirken ist es notwendig, eine Umgebungen zu schaffen, in welcher typische Ingenieurarbeitsplatzarten aufgebaut sind und die mit neuartigen Lösungen ausgestattet werden können. Dabei muss ein weites Feld an ingenieurwissenschaftlichen Tätigkeiten abbildbar sein, moderne Technologien (z.B. Virtual Reality Anwendungen oder die Eingabe mittels Touch- oder Gestensteuerung) müssen ebenso für die Nutzung bereitstehen wie informationstechnische Anwendungen (z.B. moderne Kollaborationslösungen, PLM-Systeme), die mitunter noch nicht im produktiven Einsatz, deren Verwendung aber absehbar ist. So können Nutzen und Defizite bereits frühzeitig untersucht und aufgezeigt werden.

## **2 Vorgehen**

In einem ersten Schritt wird untersucht, welche entscheidenden Merkmale des Arbeitsumfeldes bei der Bearbeitung ingenieurwissenschaftlicher Aufgabenstellungen vorherrschen, um verschiedene Ausprägungsformen des Arbeitsumfeldes in einem Labor gestalten und aufzubauen und so das Arbeitsumfeld von Morgen simulieren zu können. Hierfür werden typische Ingenieuraufgaben und -arbeitsweisen zusammengetragen und an Hand geeigneter Kriterien in Kategorien systematisiert. Die Ergebnisse werden in einem Morphologischen Kasten festgehalten. Durch Kombination der Ausprägungen der Kategorien wird ein Feld an Lösungselementen für das Labor zu gestaltet. Die Grundordnung Kategorien sowie die Ausprägungen kommen in erster Linie aus einer Literaturrecherche innerhalb anerkannter Beschreibungen ingenieurtypischer Tätigkeiten. Expertenbefragungen in Form von Interviews liefern, wo notwendig, weitere Kategorien und ergänzen die Ausprägungsformen. Die rund 15 befragten Experten haben eine Anstellung als wissenschaftliche Mitarbeiter und ingenieurwissenschaftlichen oder informationstechnischen Hintergrund. Hierdurch und durch weitere Berufserfahrung besteht hinreichende Erfahrung und Kompetenz im Bereich der Ingenieurtypischen Tätigkeiten. In den Interviews werden die Experten gebeten auf Grundlage ihrer persönlichen Erfahrungen spezielle Arbeitssituationen umfangreich zu beschreiben, um so ein umfassendes Bild von einzelnen Arbeitsweisen und den zugehörigen Randbedingungen zu erhalten. Erweitert werden die Ergeb-

nisse durch Reviews durch den Leiter des Geschäftsfeldes Virtuelle Produktentstehung sowie des Fachgebiets für Industrielle Informationstechnik. In einem Workshop mit Teilnehmern mit ingenieurwissenschaftlichem Hintergrund werden anschließend die Kategorien für die Einordnung der Arbeitsweisen im Hinblick auf ihren Einfluss auf die Gestaltung des Arbeitsplatzes gewichtet und so die für das Labor relevantesten Elemente zu identifiziert. Aus den Ergebnissen wird eine Aufteilung des gesamten Labors in verschiedene grundlegende Bereiche sowie die Gestaltung derselben vorgenommen.

### **Abgrenzung zu andere Untersuchungen**

Entsprechend der Schwerpunkte des Geschäftsfeldes „Virtuelle Produktentstehung“ am Fraunhofer IPK sowie des Fachgebietes „Industrielle Informationstechnik“ an der Technischen Universität Berlin wird auch der Fokus der Untersuchung und der Gestaltung des Labors gelegt. Maßgeblich sind die Aspekte, wie die Phasen der virtuellen Produktentstehung durch digitale Technologien, neue Arbeitsweisen und durch die IT-Bebauung beeinflusst werden. Der Fokus liegt weniger auf Aspekten beispielsweise der Ergonomie am Arbeitsplatz, der Gestaltung und Anordnung von Arbeitsplätzen sowie der Arbeitsorganisation.

## **3 Ingenieurtätigkeiten und -arbeitsweisen sowie Kategorien des Morphologischen Kasten**

Der Begriff „Ingenieur“ ist auf das Lateinische Wort *ingenium* zurückzuführen, was so viel bedeutet wie *natürlicher Verstand*, *Scharfsinn*, *schöpferischer Geist* oder *kluger Einfall* [4]. Das gesamte Aufgabenfeld der verschiedenen Ingenieurfachrichtungen nutzt „[...] allgemeingültige, branchenunabhängige Grundlagen methodischen Entwickelns und Konstruierens [...]“ [1] für Problemlösungsprozesse mittels der Anwendung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse. Diese Erkenntnisse werden in einem Prozess bestehend aus den Elementen Zielsetzung, Planung, Durchführung, Kontrolle und dem Treffen von Entscheidungen genutzt.

Innerhalb dieses Prozesses werden die generischen Tätigkeiten Problemanalyse, Problemformulierung, Systemsynthese und Systemanalyse betrieben. Die Problemanalyse beschränkt sich auf die Anwendung des beschränkten, bereits vorhandenen Wissens, Für die Problemformulierung ist hingegen ein vollständiger Informationsstand notwendig, wo-

mit in der Regel ein weiterer Informationsgewinn erforderlich ist. Die Systemsynthese beinhaltet das Erarbeiten und Kombinieren von Lösungsideen oder konkreten Lösungen. Die Systemanalyse dient der Analyse der Eigenschaften von Lösungen einschließlich der Ausgabe dieser Informationen für die spätere Lösungsauswahl. Im Morphologischen Kasten finden sich diese Einteilungen in der Kategorie „Aktivität oder Aufgabe“ wieder (vgl. Tabelle 3).

Ähnliches beschreibt Ehrlenspiel [5]: Hier wird zwischen den Grundtätigkeiten sowie den unterstützenden Tätigkeiten unterschieden, wie in Tabelle 1 dargestellt.

Außerdem unterscheidet Ehrlenspiel nach den Schwerpunkten der verschiedenen Arten von Ingenieuren in Entwicklungskonstrukteure, Entwurfskonstrukteure, Detailkonstrukteure / CAD-Techniker, Berechnungsingenieure, Angebotsingenieure, Projektleiter, Fertigungsplaner, NC-Programmierer und Vorrichtungskonstrukteure. Dabei können insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) diese Berufsbilder verschwimmen und ein Ingenieur muss je nach Erfordernis mehrere Aufgabengebiete abdecken können. Es lässt sich so schließen, dass es nicht einen idealen Arbeitsplatz für den Ingenieur geben kann, sondern dieser nach Bedarf unterschiedliche Umgebungen und damit eine gewisse Flexibilität bieten muss.

Entsprechende oder ähnliche Unterscheidungen der ingenieurstechnischen Aufgaben lassen sich auch am Grundmuster der Lebenszyklusphasen und den resultierenden Anforderungen festmachen. So verschieben sich die Tätigkeiten entsprechend der Ziele bzw. Ergebnisse der sechs Phasen der Planung, der Entwicklung und Konstruktion, der Fertigung, Montage und Prüfung, des Vertriebs und Verkaufs bzw. der Beratung, des Gebrauch, Verbrauchs und der Instandhaltung sowie der thermische Nutzung bzw. dem Recycling [1].

Tabelle 1: Grundtätigkeiten und begleitende Tätigkeiten beim Konstruieren (nach [5])

|                            |                                  | Tätigkeiten                              |
|----------------------------|----------------------------------|--|
| Grundtätigkeiten           | Lösungen suchen                  | Anforderungen klären                     |
|                            |                                  | Prinzipielle Lösung Suchen               |
|                            |                                  | Gestalterische Lösung suchen             |
|                            |                                  | herstellgerecht gestaltete Lösung suchen |
|                            | Analysieren und Lösung auswählen | Berechnen, Simulieren, Optimieren        |
|                            |                                  | Experimentieren                          |
|                            |                                  | Beurteilen, Entscheiden                  |
|                            | Darstellen                       | Zeichnerisch darstellen                  |
|                            |                                  | Schriftlich darstellen                   |
| unterstützende Tätigkeiten |                                  | Sich informieren                         |
|                            |                                  | Strukturieren, Ordnen                    |
|                            |                                  | Kontrollieren, Prüfen                    |
|                            |                                  | Korrigieren                              |
|                            |                                  | Organisieren, Planen                     |
|                            |                                  | Korrespondieren                          |
|                            |                                  | Diskutieren, Beraten                     |

Diese Beschreibung schlägt sich in der Grundordnung des Morphologischen Kastens (vgl. Tabelle 3) ebenfalls in der Kategorie „Aktivität oder Aufgabe“ nieder.

Ebenfalls muss erwähnt werden, dass durch immer komplexere Entwicklungen, wie z.B. mechatronische Systeme oder Product-Service Systems der Bedarf an Kommunikation und Kollaboration sowie interdisziplinärer Zusammenarbeit steigt [5], [6], [7]. Zudem steigt mit der Anwendung von immersiven virtuellen Umgebungen auch der Bedarf an entsprechender Ausstattung. Zukünftige Arbeitsumgebungen müssen dies sowohl hinsichtlich der technischen Ausstattung des Arbeitsplatzes als auch durch IT-Systeme unterstützen.

Im Morphologischen Kasten (vgl. Tabelle 3) finden sich diese Erkenntnisse durch Einführung der Kategorien „Form der Interaktion mit Personen“, „Art der Interaktion mit Objekten“, „Art der Bedienung von IT-Eingabegeräten“ sowie „Grad der Formalität“ mit den entsprechenden Ausprägungen wider.

### 3.1 Expertenbefragung

Die Expertenbefragung wurde für die Vervollständigung der Kategorien des Morphologischen Kastens genutzt sowie für die Vervollständigung der Ausprägungsformen. In der

Befragung wurden die Experten gebeten sich an konkrete Arbeitssituationen zu erinnern und die wesentlichen Aspekte dieser Situationen zu nennen. Diese Aspekte wurden dann entweder Kategorien des Morphologischen Kasten als Ausprägungen zugeordnet oder entsprechend geeignete neue Kategorien hinzugefügt. Für die Wahl der Situationen bestand die Bitte, auf Grundlage des bereits erarbeiteten Morphologischen Kasten möglichst Situationen zu beschreiben, in denen Aspekte zum Tragen kommen, die bisher nicht in Form von Kategorien aufgenommen wurden.

Die Situationsbeschreibungen der Experten verdeutlichten, dass die Aspekte „Anzahl der beteiligten Personen“, „Ambiente des Ortes“ sowie „Grad der Formalität“ bisher unbeachtet waren. Da diese ebenso wichtig erscheinen, wurden sie als Kategorien des Morphologischen Kasten (vgl. Tabelle 3) aufgenommen.

Die Ergebnisse wurden vom Leiter des Geschäftsfeldes gereviewt. Hier wurde insbesondere auf die Unterschiede bei der Art des Ergebnisses der verschiedenen Ingenieur Tätigkeiten eingegangen sowie auf die teilweise auch international recht unterschiedlichen Üblichkeiten bezüglich der Anzahl der Arbeitsplätze in einem Büro sowie die Gestaltung und Aufteilung der Arbeitsplätze. Der erste Punkt findet sich in „Aktivität oder Aufgabe“ wieder, der zweite sowie dritte Punkt in der Kategorie „Arbeitsstation“.

### **3.2 Grundelemente des Morphologischen Kasten**

Tabelle 2 zeigt die Grundelemente des Morphologischen Kasten sowie ihre jeweiligen Urheber.



Tabelle 2: Kategorien des Morphologischen Kasten mit Haupturheber und beispielhaften Ausprägungen

| Kategorie im Morphologischen Kasten     | Urheber                       | Beispielausprägungen   |
|---|-------------------------------|--|
| Aktivität oder Aufgabe                  | [1], [5], Review              | modellieren / zeichnerisch oder schriftlich darstellen, revidieren / beurteilen / kontrollieren / freigeben, konstruieren, Lösung suchen, berechnen, experimentieren, physisch arbeiten, sich informieren, korrigieren |
| Arbeitsstation                          | [1], [5], Review              | Einzelarbeitsplatz, gemeinsames Büro, Meeting, Werkstatt   |
| Form der Interaktion mit Personen       | [5], [6], [7]                 | Physisch / persönlich, fernkollaborativ: schriftlich / textuell, akustisch, Bildübertragung  |
| Art der Interaktion mit Objekten        | [5], [6], [7]                 | virtuell, physisch, mixed  |
| Art der Bedienung von IT-Eingabegeräten | [5], [6], [7]                 | Touch-Bedienung, Gestensteuerung, Maus / Tastatur  |
| Anzahl der beteiligten Personen         | Expertenbefragung / Szenarien | 1, 2, 3, ... (Einzelarbeit, Kleingruppe, Meeting / Workshop mit mehreren Beteiligten)  |
| Ambiente des Ortes                      | Expertenbefragung / Szenarien | Büroumgebung, formell / förmlich   |
| Grad der Formalität                     | Expertenbefragung / Szenarien | Informell, Formell / offizieller Arbeitsplatz, repräsentative Räumlichkeit   |

### 3.3 Kategorien des Morphologischen Kasten und Ausprägungen

Die Ausprägungen der Kategorien des morphologischen Kasten wurden in der Literaturrecherche und der Expertenbefragung aufgenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 abgebildet.

Tabelle 3: Morphologischer Kasten – Kategorien und Ausprägungen

| Kategorie                               | Ausprägungen   |  |                             |  |                                    |                 |                   |
|---|--|--|-----------------------------|--|------------------------------------|-----------------|-------------------|
| Aktivität oder Aufgabe                  | modellieren / zeichnerisch oder schriftlich darstellen | reviewen / beurteilen / kontrollieren / freigeben  | konstruieren                | Lösung suchen / sich informieren       | berechnen                          | experimentieren | physisch Arbeiten |
| Arbeitsstation                          | Einzelarbeitsplatz / Einzel-Büro                       | Einzelarbeitsplatz / gemeinsam genutztes Büro      | Meeting                     | Workshop / Kreativbereich              | Werkstatt                          | „vor Ort“       | mobil             |
| Form der Interaktion mit Personen       | physisch / persönlich                                  | schriftlich / textuell (Chat / Email / Postalisch) | fernkollaborativ akustisch  | fernkollaborativ inkl. Bildübertragung | Mix-Formen                         |                 |                   |
| Art der Interaktion mit Objekten        | physisch   | virtuell   | mixed                       |  |                                    |                 |                   |
| Art der Bedienung von IT-Eingabegeräten | Maus / Tastatur  | Touch-Bedienung                                    | Gestensteuerung             | Sprachsteuerung                        | Steuerung über eine weitere Person |                 |                   |
| Anzahl der beteiligten Personen         | Einzelperson (Anzahl 1)                                | Kleingruppe (2 – 5)                                | größere Gruppe (ca. 6 – 12) | Große Gruppe (ab ca. 13)               |                                    |                 |                   |
| Ambiente des Ortes                      | Büroumgebung   | förmlich / schick                                  | kreativ / experimentell     | laborhaft                              |                                    |                 |                   |
| Grad der Formalität                     | informell  | offizieller Arbeitsplatz                           | repräsentative Räumlichkeit |  |                                    |                 |                   |

### 3.4 Gewichtung der Kategorien des Morphologischen Kastens

Die Kategorien des Morphologischen Kastens werde in einem weiteren Schritt gewichtet, um die Gestaltung des Labors dahingehend steuern zu können, dass die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale genutzt werden. Dies ist notwendig, da eine führende Kategorie für die Gestaltung des Labors gebraucht wird. Hierfür wurde in einem Workshop die Vereinbarkeit der verschiedenen Ausprägungsformen der einzelnen Kategorien in einem vollständigen paarweisen Vergleich diskutiert und geprüft.

Diejenigen Kategorien, deren Ausprägungen als besonders schwierig mit den Ausprägungen von anderen Kategorien angesehen wurden, wurden als führende Kategorien für die Gestaltung genommen. Bestimmte Ausprägungen der Kategorien „Arbeitsstation“, „Anzahl der beteiligten Personen“, „Aktivität oder Aufgabe“ sowie „Ambiente des Ortes“

wurden als widersprüchlich zu Ausprägungen von anderen Kategorien angesehen. Als Ergebnis der Diskussion wurde jedoch des Weiteren festgehalten, dass einige der im Morphologischen Kasten durch Kombination erzielbaren Konstellationen nicht praxisrelevant sind. Beispielsweise erfordert die Aktivität „physisch Arbeiten“ kein Ambiente der Form „förmlich oder schick“. Eine Bedienung dieser Kombination in Form eines Werkstattarbeitsplatzes mit hohem formellem Charakter ist so nicht erforderlich. Zudem wurde festgehalten, dass einige der Ausprägungen von bestimmten Kategorien flexibel durch entsprechende Ausstattung herstellbar sind und so weitgehend unabhängig von der übrigen Gesamtgestaltung erreicht werden können. Dies betrifft insbesondere die Kategorie „Anzahl der Beteiligten“. Hier kann durch einen großzügigen Bewegungsplatz sowie die Möglichkeit zur Einbindung von IT-Geräten an einzelnen Stationen des Labors eine ausreichende Flexibilität erreicht werden. Außerdem können die Ausprägungen der Kategorie „Art der Bedienung von IT-Geräten“ durch eine umfangreiche Ausstattung mit entsprechenden Eingabegeräten. Nachfolgend sind die Ergebnisse bezüglich der einzelnen Kategorien aufgezählt:

**Arbeitsstation:** Diese Kategorie ist als führend anzusehen, wobei einzelne unterschiedliche Ausprägungen leicht an gleichen Stationen denkbar sind, z.B. Werkstatt und „vor Ort“.

**Anzahl der beteiligten Personen:** Bei dieser Kategorie erscheinen bestimmte Kombinationen nicht notwendig, an einem Einzelarbeitsplatz ist die Interaktion mit einer größeren Anzahl Beteiligter nicht notwendig, jedoch soll durch ausreichende Verkehrsflächen eine Flexibilität an allen Stationen ermöglicht werden.

**Aktivität oder Aufgabe:** Die Ausprägungen dieser Kategorie stehen klassischerweise in engem Zusammenhang mit den Arten der Arbeitsstationen. Obwohl auch neuartige Kombinationen im Labor erprobt werden sollen, ist doch weiterhin davon auszugehen, dass bei entsprechenden Aktivitäten (z.B. Abhalten eines Meetings) eine geeignete Arbeitsstation gewählt werden wird.

**Ambiente des Ortes:** Das Ambiente des Raumes wird weitgehend durch die Art der Arbeitsstation bestimmt. Eine Steuerung in gewissen Grenzen scheint möglich. Eine freie Kombination unterschiedlichster Ausprägungen in jeder Art der Arbeitsstation ist jedoch nicht notwendig.

**Grad der Formalität:** Diese Kategorie ist ähnlich zu bewerten wie die Kategorie „Ambiente des Ortes“. Sie kann in gewissen Grenzen bewusst gesteuert werden, wobei eine hohe Flexibilität bei der Zuordnung zu den verschiedenen Arbeitsstationen nicht notwendig ist.

**Form der Interaktion mit Personen:** Diese Kategorie erfordert an den einzelnen Bereichen des Labors eine hohe Flexibilität. Sie kann durch entsprechende Ausstattung der verschiedenen Arbeitsstationen mit Kameras, Mikrofonen und Lautsprechern sowie ausreichender Fläche an den einzelnen Stationen realisiert werden.

**Art der Bedienung von IT-Eingabegeräten:** Die Art der Bedienung von IT-Eingabegeräten ist weitgehend unabhängig von den Ausprägungen der anderen Kategorien und im Wesentlichen von der technischen Ausstattung an den Laborstationen beschränkt.

**Art der Interaktion mit Objekten:** Bei dieser Kategorie kann die Ausprägung „virtuell“ durch entsprechende IT-Ausstattung sowie „mixed“ und „physisch“ durch die Wahl der Experimentiergegenstände an sämtlichen Arbeitsstationen sichergestellt werden. Bei der Wahl entsprechend handlicher physischer Objekte sowie ggf. kleiner bis mittelgroßer Apparaturen, die physische Objekte virtuell erweitern (z.B. mittels einer Augmented-Reality Technologie und Anwendung) sowie ausreichender Fläche an den Arbeitsstationen ist den Anforderungen Rechnung getragen.

Mit den Ergebnissen dieser Gewichtung sowie der Anordnung in gezeigter Rangordnung und den erwähnten Steuerungsmöglichkeiten wird das Gestaltungskonzept erarbeitet. Im Hinblick auf die Gestaltung des Labors ist vornehmlich die Art der Arbeitsstation entscheidend. Die übrigen Elemente wie vorhandene IT für die Kollaboration oder der Zugriff auf digitale Modelle lässt sich bei entsprechend flexibler Verschaltung und Beweglichkeit bzw. einer Überbestückung mit entsprechenden Medien räumlich flexibel organisieren. Die Kategorien „Ambiente des Ortes“ sowie „Grad der Formalität“ stehen in sehr engem Zusammenhang zueinander, gewisse Kombinationen müssen hier auf Grund mangelnden Praxisbezugs nicht vom Labor bereitgestellt werden können.

## **4 Lösungskonzept**

### **4.1 Aufbau des Gesamtlabors**

Die Analyse zeigt, dass eine Aufteilung entsprechend den Ausprägungsformen der Kategorie „Arbeitsstation“ besonders notwendig ist. Außerdem sind die schwer zu verei-

nenden unterschiedlichen formalen Charaktere zu trennen, wobei sich diese klassischerweise an der Art der Arbeitsstation orientieren. Das Konzept sieht daher eine Aufteilung in drei Bereiche vor:

### **Konferenzbereich**

In einem ersten Teil des Gesamtlabors soll ein Konferenzbereich entstehen, wo bis zu zehn Personen gleichzeitig Platz finden. Außerdem soll in diesem Bereich auch eine Möglichkeit für eher informelle Teile des Arbeitens in ansprechendem Ambiente bestehen.

### **Werkstattbereich**

In einem zweiten Teil des Labors soll, räumlich getrennt zum ersten Teil, eine Möglichkeit zur Simulation von Werkstattarbeit oder Arbeit „vor Ort“ geschaffen werden. Die Verwendung verschiedener mobiler Gerätemuss ebenso gewährleistet werden wie die Ausstattung mit verschiedenen Exponaten. Dies gilt auch für die Einbeziehung von außerhalb des Labors liegenden Bereichen aus dem Forschungsinstitut.

### **Büro-Arbeitsbereich mit Kreativbereich und informellem Meetingpoint**

In einem dritten Teil des Labors sind Möglichkeiten zur Abbildung typischer ingenieurstechnischer Büroarbeiten vorgesehen. Hierzu zählen die üblicherweise anzutreffenden Schreibtische. Dabei fällt, da viele Aufgaben aus dem Ingenieuralltag üblicherweise in gemäßigten Großraumbüros (also mit mehr als einen aber deutlich weniger als zehn Arbeitsplätzen) stattfinden, die Wahl bei der Ausstattung auf zwei gegenüberliegende Schreibtische. So kann sowohl die Situation in einem Büro mit Kollegen als auch in einem Einzelbüro simuliert werden. Eine Möglichkeit, den Büroarbeitsplatz ggf. ohne Umbauten zu einem Arbeitsplatz für Kleingruppen zu erweitern wird durch die Gestaltung des gesamten Büro-Arbeitsbereiches umgesetzt werden. In diesem Bereich des Labors ist ebenso der wenig formelle aber geplant zu nutzende Kreativbereich angesiedelt, wie ein Beispiel für einen typischen informellen Meetingpoint, eine angedeutete Teeküche.

## **4.2 Ausstattung**

Das Labor soll modern gestaltet, als Präsentationsfläche hochwertig und ansprechend ausgeführt und es soll technisch fortschrittlich und zukunftsfähig ausgestattet sein. Die Beratung sowie Baubetreuung eines Architekten stellen die moderne Gestaltung sowie die hochwertige Ausführung sicher. Die fortschrittliche sowie zukunftssichere Ausstattung wird

durch eine flexible Verschaltung von Ein-/Ausgabegeräten und entsprechende Rechen-technik erreicht. Hiermit kann sowohl die Nutzung von softwarebasierten Anwendungen für die Kollaboration und das flexible Arbeiten genutzt, als auch mit heutigen Mitteln bereits eine hohe Flexibilität, wie sie heute in der Anwendung befindliche Lösungen noch nicht umfassend bieten, erreicht und der Einfluss so veränderter Arbeitsweisen untersucht werden. Die Steuerung für die Einstellung der Laborszenarien erfolgt mit Tablets. Verschiedene Ambiente werden durch eine Veränderung von Lichtfarbe und -intensität sowie ggf. akustische Untermalung erreicht. Flexibilität bei Form der Interaktion mit Personen, u.a. Fernkollaboration, wird durch Ausstattung mit Kameras, Mikrofonen sowie Lautsprechern geboten.

#### 4.3 Konzept und Gestaltung



Abbildung 1: Renderings vom Konzept, oben: Konferenzbereich mit großem Tisch, unten: Arbeitsbereich mit Schreibtischen, dahinter „Teeküche“ und Kreativbereich; Bilder: B. Röder / Entwurf: F. Sukatus Architekt, H.

Hees

Abbildung 1 zeigt Renderings des Architekten mit den Grundelementen in den verschiedenen Bereichen des Labors. Die stilistische Ausrichtung entspricht noch nicht dem finalen Stand. Im Konferenzbereich werden Brauntöne vorherrschen, im Arbeitsbereich werden die aufsichtigen Flächen als Farbakzente in einem leichten Gelbton ausgeführt werden.

## 5 Ausblick

Das Labor entsteht zurzeit in den Räumen des Geschäftsfeldes „Virtuelle Produktentstehung“ am Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik in Berlin. Die Kosten für das Labor betragen rund 300 tausend Euro. Die Fertigstellung ist für den Jahreswechsel 2014 / 2015 geplant.

Neben seiner Funktion als reines Labor für die Erprobung neuer Arbeitsweisen wird die Infrastruktur sich auch im Alltag beweisen müssen, da ein Teil des Labors als Teil der üblichen Bereichsressourcen für Aufgaben des Tagesgeschäfts genutzt werden kann. Auf diese Art kann direkt die Praxistauglichkeit einzelner Lösungen erprobt werden.

## Literatur

- [1] Verein Deutscher Ingenieure: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. VDI 2221. Beuth-Verlag GmbH, Berlin, 1993
- [2] Stark, R.; Krause, F.-L.; Kind, C.; Rothenburg, U.; Müller, P.; Hayka, H.; Stöckert, H.: *Competing in engineering design – The role of Virtual Product Creation*. Journal of Manufacturing Science and Technology 3 (2010), S. 175 – 184, 2010
- [3] Müller, P.; Pasch, F.; Drewinski, R.; Hayka, H. (Autoren); Stark, R.; Drewinski, R.; Hayka, H.; Bedenbender, H. (Herausgeber): *Kollaborative Produktentwicklung und digitale Werkzeuge: Defizite heute – Potenziale morgen*. 1. Aufl. Berlin: Fraunhofer IPK, 2013. – ISBN 978-3-00-039111-8
- [4] PONS GmbH: *Schule und Studium: LATEIN – DEUTSCH*. Veränderte Neuauflage, 2007. – 978-3125175549
- [5] Ehrlenspiel, Klaus: *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 4. Aufl. München: Hanser, 2009. – ISBN 978-3-446-42013-7
- [6] Eigner, Martin; Gerhardt, Florian; Gilz, Torsten; Mogo Nem, Fabrice: *Informationstechnologie für Ingenieure*. Berlin: Springer 2012. – ISBN 978-3-642-24892-4
- [7] Lindemann, Udo: *Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 3. Aufl. Berlin: Springer 2009. – ISBN 978-3-642-01422-2

- [8] Stark, R.; Israel, J. H.; Wöhler, T.: *Towards hybrid modelling environments – Merging desktop-CAD and virtual reality-technologies*. CIRP Annals – Manufacturing Technologies 59 (2010), S. 179 – 182, 2010



## Kosteneinsparpotenzial durch die Verwendung von hohlen, generativ gefertigten Ausbrennmodellen für das Vakuum-Differenzdruck-Gießen

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Kevin Kuhlmann, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Fabian Klink,  
Prof. Dr.-Ing. Karl-H. Grote

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Institut für Maschinenkonstruktion

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik

Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg

E-Mail: kuhlmann@ovgu.de; Internet: <http://www.ovgu.de>

**Inhalt:** Das Vakuum-Differenzdruck-Gießen (VDDG) gehört zu den Gießverfahren mit verlorenen Formen und verlorenen Modellen. Die für die Erstellung der Gießform nötigen Ausbrennmodelle werden je nach gewünschter Gussstückanzahl generativ, mithilfe einer zuvor erstellten Silikonform oder mittels Dauerform gefertigt. Bei der generativen Fertigung kommen meist Vollkörper zum Einsatz. Für die Formgebung ist aber ausschließlich die äußere Hülle maßgebend, so dass die Verwendung von Hohlkörpern zur Material- und somit Kosteneinsparung möglich ist.

In diesem Beitrag werden die Kostenstrukturen in Abhängigkeit der Stückzahl am Beispiel eines einfachen Zylinders mit einem Durchmesser von 60,75 mm und einer Höhe von 60,75 mm aufgezeigt. Aufgrund der maßgeblichen Unterschiede liegt der Fokus auf der Gegenüberstellung der Kostenstrukturen, der Berechnung möglicher Break-even-Points sowie dem Aufzeigen der Kosteneinsparung durch die Verwendung von generativ gefertigten Hohlkörpern.

**Abstract:** The vacuum differential pressure casting (VDDG) belongs to the casting methods where lost molds and pattern are used. Lost pattern, which are necessary to produce the casting mold, are manufactured generatively with the aid of a previously fabricated silicon or a permanent mold. The production of the lost molds depends on the quantity of the casting units. Often solid bodies are used to manufacture molds generatively. For forming a mold just the outer hull is decisive, so that the use of hollow bodies to save material and cost seems to be possible.

The structure of costs depending on the quantity of units will be illustrated using the example of a cylinder with a caliber of 60.75 mm and a height of 60.75 mm. Because of the standard differences the comparison of the structures of costs, the calculation of the break-even-points and to depict possibilities to save costs by using generatively manufactured molds are focused in this abstract.

**Stichwörter:** Feinguss, Vakuum-Differenzdruck-Gießen, Ausschmelzmodelle, Kostenbetrachtung, generative Fertigung, Break-even-Points

**Keywords:** investment casting, pattern, generative manufacturing, costing, cost savings, break-even-points

## 1 Einleitung

Das Vakuum-Differenzdruck-Gießen (VDDG), eine Sonderform des Feingießens, ist ein urformendes Fertigungsverfahren, bei dem mit Hilfe von Ausschmelz- bzw. Ausbrennmodellen (AM) einteilige Gießformen hergestellt werden.

Aufgrund seines charakteristischen Herstellungsprozesses ist dem Konstrukteur bei diesem Verfahren ein Höchstmaß an gestalterischer Freiheit gegeben. Komplexe Konturen, geringe Wandstärke und sogar Hinterschneidungen sind problemlos gießbar; Hohe Maß- und Oberflächengenauigkeiten stellen dabei keine Hindernisse dar. Das VDDG lässt sich zudem von der Prototypenfertigung bis hin zur automatisierten Großserienfertigung wirtschaftlich einsetzen. Übliche Stückmassen liegen zwischen 2 g und 30 kg. Die Technologie findet daher in sämtlichen Industriezweigen, beispielsweise der Automobilindustrie, der Medizintechnik sowie der Schmuckindustrie Anwendung. [1]

Die Herstellung, der für das Verfahren charakteristischen AM, kann auf verschiedene Weisen erfolgen. Gerade bei geringen Stückzahlen, wie sie im Prototypenbau üblich sind, wirken sich die Herstellkosten für die zwingend benötigten generativ gefertigten Ur- bzw. Ausbrennmodelle stark auf den Gesamtpreis pro fertiges Gussteil aus. Eine Möglichkeit diese Kosten zu senken, besteht darin die Ausbrennmodelle hohl zu bauen und so Material zu sparen.

## 2 Stand der Technik

Der Prozess des Vakuum-Differenzdruck-Gießens (VDDG, siehe Abbildung 1) beginnt mit der Herstellung der Ausschmelz- bzw. Ausbrennmodelle. Je nach gewünschter Gussteileanzahl erfolgt diese über die Injektion von Wachs in eine Dauerform oder in eine zuvor erstellte Silikonform. Bei geringen Stückzahlen werden die AM generativ gefertigt. Das heißt, dass für die Herstellung der AM keine Werkzeuge nötig sind. Im zweiten Schritt werden die AM mit einem Gießsystem aus Wachs zu einer Gießtraube zusammengebaut. Wie im rechten Teil des 3. Schritts zu sehen, folgt das Einbetten mithilfe einer sogenannten Küvette. Die Wachstraube wird dabei unter Vakuum massiv von einer keramikartigen Einbettmasse umhüllt. Die Masse ist ein sehr poröses und mit Fasern angereichertes Material. Für das Ausschmelzen des Wachses und das Brennen der Form wird im Gegensatz zum Schalenformverfahren (3. und 4. Schritt links) nur ein einziger Ofen benötigt.

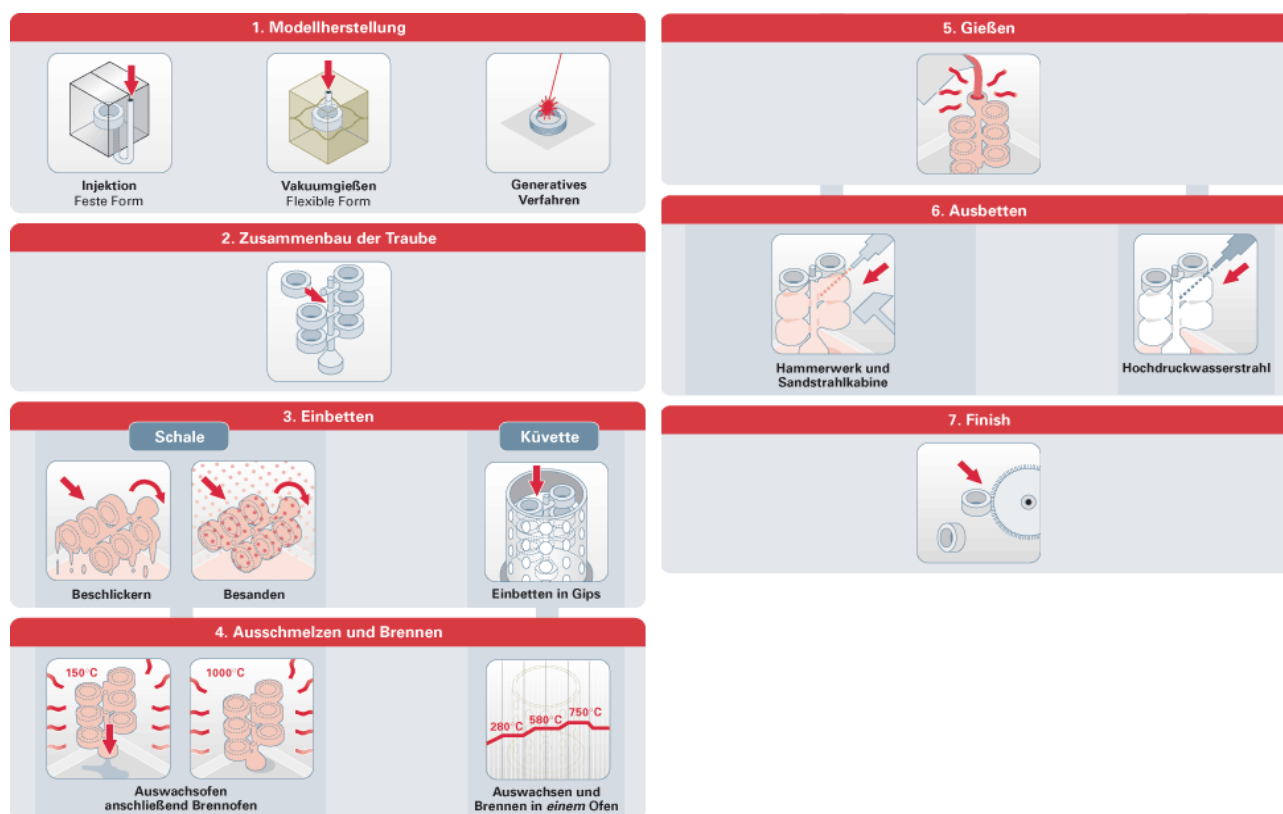


Abbildung 1: Verfahrensablauf Feingießen [2]

Der Name des Vakuum-Differenzdruck-Gießens leitet sich letztendlich vom Gießprozess ab. Hierbei befindet sich die Gießform (Kuvette) in einer evakuierten Kammer. Der Schmelztiigel, mit der darin enthaltenen Schmelze, ist über der Form angeordnet und wird durch Schutzgas (Argon) mit einem Überdruck beaufschlagt. Aufgrund der porösen, mit kleinen Kanälen durchzogenen Form wird die Schmelze beim Gießen einerseits durch das Vakuum in die Form hineingezogen und andererseits in die Form durch den Druck des Schutzgases hineingedrückt. Dies sorgt für eine optimale Befüllung der Form, außerdem kann sich die Schmelze gleichmäßig in der Form verteilen und es sind keine Speiser nötig. Nach dem Erstarren und Aushärten des Gusses folgt der Schritt des Ausbettens mit Hilfe eines Hochdruckwasserstrahls. Als letzter Schritt erfolgt die Endbearbeitung. Die einzelnen Gussstücke werden von der Traube gelöst, die Übergangstellen glatt geschliffen und ggf. poliert. [2–4]

### 3 Kostenbetrachtung

Wie bereits beschrieben, erfolgt bei geringen Stückzahlen, wie sie bei Prototypen oder Kleinst- und Kleinserien üblich sind, die Herstellung der massiven AM mittels generativer Fertigungsverfahren (3D-Druck). Die Software zerlegt dazu das CAD-Modell in Schichten und fügt Stützkonturen hinzu, der Drucker fertigt das Modell anschließend Schicht für Schicht. Nach Beendigung des Vorgangs werden die Stützkonturen entfernt und ggf. benötigte Nacharbeiten durchgeführt. [1]

Im Folgenden wird die Kostenstruktur für im Polyjet-Verfahren generativ gefertigte Ausbrennmodelle am Beispiel eines einfachen Zylinders (Höhe und Durchmesser je 60,75 mm) erarbeitet. Anschließend werden die Kosten von massiven und hohlen Ausbrennmodellen gegenübergestellt. Die Kosten des Verfahrens sind jeweils in Material-, Fertigungs- und Herstellkosten unterteilt. Für die Betrachtungen wurden Preise für benötigtes Material, zu verrichtende Arbeit und eingesetzte Maschinen festgelegt. Die Kosten für die Materialien wurden aus Angeboten und früheren Bestellungen übernommen [5]. Der Stundensatz für den Mitarbeiter entspricht einem üblichen Stundensatz eines technischen Mitarbeiters i. H. v. 65,00 € [6]. In Tabelle 1 sind die einzelnen Material- und Fertigungskosten aufgeführt.

Tabelle 1: Kostensätze für Material und Arbeit

|                                   |        |
|-----------------------------------|--------|
| Materialkosten                    | [€/kg] |
| Modellmaterial FullCure720        | 200    |
| Stützmaterial FullCure705 Support | 100    |
| Fertigungskosten                  | [€/h]  |
| Objet Eden330                     | 40     |
| Hochdruckwasserstrahlanlage       | 50     |
| Mitarbeiter                       | 65     |

Die Kostenbetrachtung der Ausschmelzmodelle erfolgt von einem bis fünf Ausschmelzmodellen und danach in Fünferschritten bis zu einer Stückzahl von 50 Ausschmelzmodellen. Jede beliebige Stückzahl zwischen 1 und 50 zu betrachten würde nur die Übersichtlichkeit verringern, aber keinen signifikant höheren Informationsgehalt liefern.

### 3.1 Generativ gefertigt massiv

Bei der Herstellung von Ausschmelzmodellen mit Hilfe der generativen Fertigungsverfahren werden weder Urmodell, Silikonform noch Dauerform benötigt. Die generativ gefertigten Modelle sind in diesem Fall gleichzeitig die Ausbrennmodelle. Damit werden Fertigungszeit sowie Material- und Fertigungskosten für die Herstellung der Silikonformen und Dauerformen eingespart, es entstehen keine Fixkosten. Abhängig von der Stückzahl ergeben sich die in Tabelle 2 aufgelisteten Material-, Fertigungs- sowie Herstellkosten. Zur Wahrung der Übersicht sind die Werte gerundet.

Tabelle 2: Herstellkosten für generativ gefertigte massive Ausbrennmodelle

| Anzahl Bauteile           | 1     | 5     | 10    | 15    | 20    | 25    | 50    |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Modellmaterial [g]        | 283   | 1334  | 2666  | 3984  | 5303  | 6619  | 13238 |
| Modellmaterial Kosten [€] | 57    | 267   | 533   | 797   | 1061  | 1324  | 2648  |
| Stützmaterial [g]         | 48    | 158   | 336   | 477   | 617   | 755   | 1510  |
| Stützmaterial Kosten [€]  | 5     | 16    | 34    | 48    | 62    | 76    | 151   |
| Materialkosten [€]        | 61    | 283   | 567   | 845   | 1122  | 1399  | 2799  |
| Fertigungsdauer [h:min]   | 08:40 | 11:11 | 16:58 | 22:11 | 27:06 | 31:15 | 62:30 |
| Dauer Nacharbeit [h:min]  | 0:10  | 0:50  | 1:40  | 2:30  | 3:20  | 4:10  | 8:20  |
| Fertigungskosten [€]      | 365   | 543   | 870   | 1174  | 1467  | 1729  | 3458  |
| Herstellkosten [€]        | 426   | 826   | 1437  | 2019  | 2589  | 3128  | 6257  |

Da mit dieser Methode immer genau die Anzahl an benötigten Teilen gedruckt wird, steigen die Materialkosten mit jedem herzustellenden AM. Der 3D-Drucker kann bis zu 25 Zylinder gleichzeitig drucken. Bis zu dieser Stückzahl steigen die Kosten aufgrund von zwischenzeitlichen Spülvorgängen der Düsen des Druckers nicht stetig an. Die Materialkosten für einen voll belegten Bauraum belaufen sich auf 1399,30 €. Neben den Materialkosten werden die Fertigungskosten zur Herstellung der AM betrachtet. Eine Maschinenstunde ist mit 40,00 € veranschlagt. Hinzu kommen je AM 19,17 € für die Nacharbeit. Die Fertigungsdauer steigt ähnlich wie die verwendete Materialmenge nicht stetig mit der Stückzahl an. Für 25 Modelle ergibt sich eine Fertigungsdauer von 31 Stunden und 15

Minuten. Die Fertigungskosten von einem voll belegten Bauraum belaufen sich somit auf 1.729,17 €. Aus den Material- und Fertigungskosten ergeben sich die Herstellkosten. Multipliziert man die Kosten für einen voll belegten Bauraum mit der nötigen Anzahl, ergeben sich die Gesamtkosten für 50, 75 (usw.) Gussteile.

### **3.2 Generativ gefertigt hohl**

Wie bereits beschrieben, besteht die Möglichkeit generativ gefertigte Hohlkörper als Ur- bzw. Ausbrennmodelle zu verwenden. In einer vorherigen Arbeit wurde für den Zylinder eine Topologieoptimierung der Innenstruktur durchgeführt.

Der erarbeitete Zylinder verfügt am Mantel über eine Wandstärke von 1 mm, Boden- und Deckfläche sind 2 mm stark. Zusätzlich sind im Inneren 8 konkave Rippen angebracht, die die auftretenden Kräfte aufnehmen bzw. ableiten. Das Volumen dieses Hohlzylinders beträgt 24,16 cm<sup>3</sup>. Zum Vergleich: ein Vollzylinder mit denselben Abmaßen hat ein Volumen von 176,09 cm<sup>3</sup>. [7]

Technologiebedingt ist es mit dem im Rahmen der Forschungstätigkeiten genutzten Polyjet-Verfahren nicht möglich Hohlräume ohne Stützmaterial zu drucken. D. h. für die Fertigung der Oberseite/Deckfläche müsste die geplante Hohlstruktur mit Supportmaterial gefüllt sein, eine Entfernung des Supportmaterials wäre dann aber aufgrund der geschlossenen Form nicht realisierbar. Deshalb sind die Zylinder im CAD-Programm mittig zu halbieren, so dass für einen Hohlzylinder zwei baugleiche (napfartige) Hälften zu fertigen sind. Dies bringt neben der Materialeinsparung einen weiteren Vorteil mit sich. Durch die Halbierung der Bauhöhe reduziert sich die Bauzeit, was sich wiederum positiv auf die Fertigungskosten auswirkt.

In Tabelle 3 sind die gerundeten Werte der Material-, Fertigungs- und Herstellkosten für den erarbeiteten Hohlzylinder aufgetragen. Genau wie bei den gedruckten massiven AM hängen auch bei den gedruckten hohlen AM die Kosten direkt von der zu fertigen Stückzahl ab. Aufgrund des geringen Materialverbrauchs und der kürzeren Druckzeit sind weniger Spülvorgänge als bei massiven Bauteilen nötig.

Tabelle 3: Herstellkosten für generativ gefertigte hohle Ausbrennmodelle

| Anzahl Bauteile           | 1    | 5    | 10    | 15    | 20    | 25    | 50    |
|---------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Modellmaterial [g]        | 64   | 307  | 605   | 912   | 1210  | 1504  | 3008  |
| Modellmaterial Kosten [€] | 13   | 61   | 121   | 182   | 242   | 301   | 602   |
| Stützmaterial [g]         | 73   | 331  | 652   | 983   | 1304  | 1612  | 3224  |
| Stützmaterial Kosten [€]  | 7    | 33   | 65    | 98    | 130   | 161   | 322   |
| Materialkosten [€]        | 20   | 94   | 186   | 280   | 372   | 462   | 924   |
| Fertigungsdauer [h:min]   | 4:45 | 8:28 | 13:49 | 22:17 | 27:38 | 32:38 | 65:16 |
| Dauer Nacharbeit [h:min]  | 0:15 | 1:15 | 2:30  | 3:45  | 5:00  | 6:15  | 12:30 |
| Fertigungskosten [€]      | 219  | 482  | 840   | 1322  | 1680  | 2024  | 4048  |
| Herstellkosten [€]        | 239  | 576  | 1026  | 1602  | 2052  | 2486  | 4972  |

Da für hohle Zylinder zwei napfartige Zylinderhälften zu drucken sind, ist die Bauplattform der Objet Eden330 bereits mit 25 Zylinderhälften, also 12,5 Zylindern voll belegt. Für die Berechnung bedeutet dies, dass die Verbräuche, Zeiten und Kosten für 25, 50 usw. Ausbrennmodelle Vielfache einer voll belegten Bauplattform sind.

Aufgrund der größeren Oberfläche der Hohlzylinder (Innenflächen) ist der Nachbearbeitungsaufwand größer. Die Herstellkosten für ein generativ gefertigtes hohles AM betragen 239 €, für fünf 576 €, für 25 Stück 2486 €, für 50 Stück 4972 € usw.

## 4 Break-even-Points

Wirtschaftswissenschaftlich gesehen ist ein Break-even-Point ein Punkt, an dem die Erlöskurve die Kostenkurve schneidet. D.h. Erlös und Kosten einer Produktion oder eines Produktes sind bei der entsprechenden Ausbringungsmenge gleich groß. Wird dieser Punkt überschritten, so wird ein Gewinn erwirtschaftet. Er stellt somit die Gewinnschwelle dar. Vergleicht man stattdessen die Kosten von zwei oder mehreren Verfahren miteinander, so lässt sich in Abhängigkeit der Stückzahl das wirtschaftlichste Verfahren ermitteln. [8]

In Abbildung 2 sind die Herstellkostenkurven von massiv und hohl gefertigten Ausbrennmodellen zu sehen. Zusätzlich ist die Kostenkurve bei Nutzung der Silikonform zum

Herstellen der AM eingezeichnet, sie ist [9] entnommen. Dadurch lassen sich die Break-Even-Points und somit der Einfluss der Materialeinsparung gut erkennen.

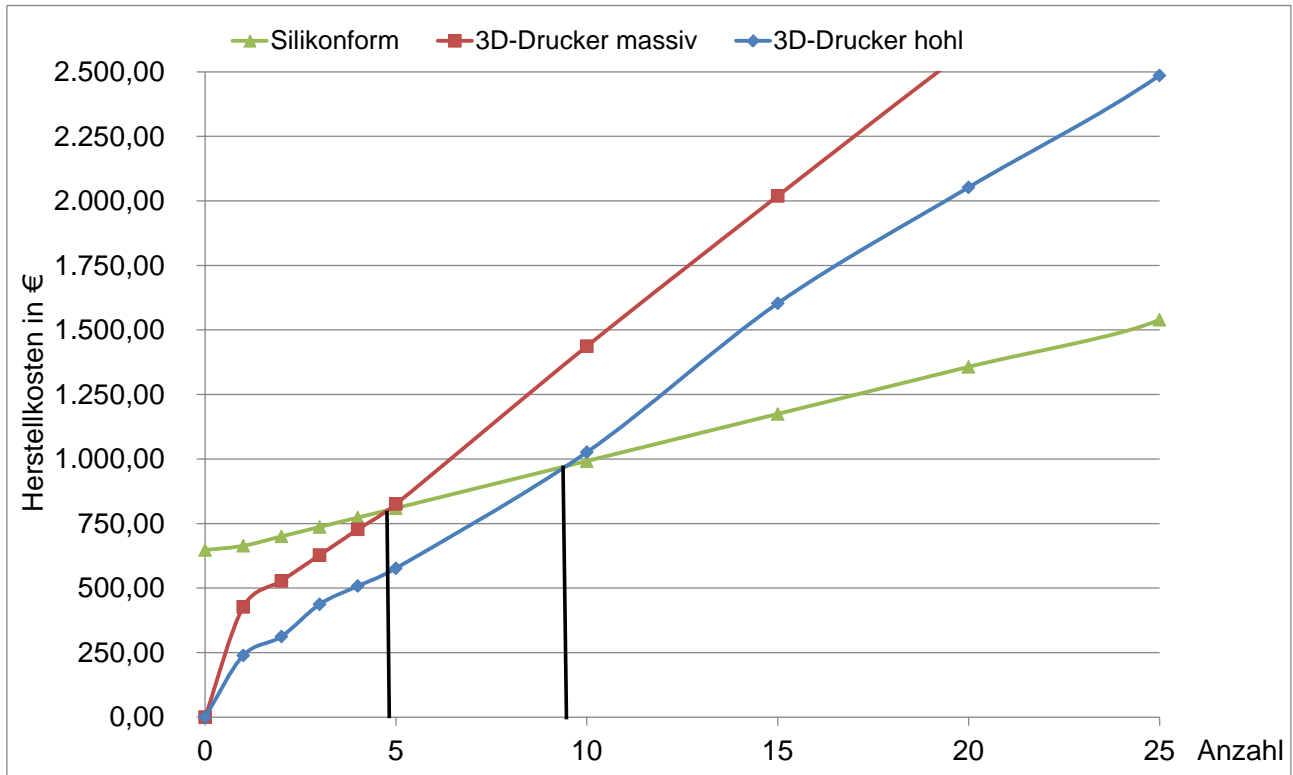


Abbildung 1: Herstellkosten mit Break-even-Points bei Verwendung von hohlen und massiven generativ gefertigten Ausbrennmodellen

Der erste Schnittpunkt befindet sich rechnerisch bei 4,75 Ausbrennmodellen. Er stellt den ersten Break-even-Point zwischen 4 und 5 Bauteilen dar. 4 generativ gefertigte Ausbrennmodelle kosten 727,60 €, dieselbe Anzahl mithilfe der Silikonform zu produzieren kostet 773,23 €. 5 Ausschmelzmodelle kosten analog 825,77 € bzw. 809,73 €. Grund für die Kostendifferenz sind die unterschiedlichen Kostenstrukturen. Bei der generativen Fertigung der AM fallen keine Fixkosten an, dafür steigt die Kostenfunktion relativ steil an. Im Prozess der Ausschmelzmodellherstellung mithilfe einer Silikonform verursachen die Anfertigung der Silikonform und das nötige Urmodell Fixkosten von ca. 647 €. Dafür sind die variablen Kosten geringer, die Kurve steigt entsprechend flacher an.

Die Kosten für die generativ gefertigten hohlen AM steigen etwas flacher an als die Kosten der massiven Variante, aber immer noch steiler als die variablen Kosten der Silikonform. Wie bereits beschrieben, sind die variablen Kosten für das Drucken der Teile aufgrund von zwischenzeitlichen Spülvorgängen der Druckköpfe nicht konstant. Daher ist



auch der Anstieg durch leichte Schwankungen gekennzeichnet. Es lässt sich weiterhin feststellen, dass der Anstieg der durchschnittlichen variablen Kosten für ein Ausbrennmodell von 153,84 € durch die Material- und Druckzeiteinsparung auf 117,48 € gesenkt wurde.

Der Break-even-Point liegt damit bei 7,99 AM. Sinngemäß wie bei den massiven AM ist bis zu einer Stückzahl von 7 AM die generative Fertigung am wirtschaftlichsten, ab 8 AM sollte aus wirtschaftlicher Sicht die Herstellung mithilfe einer Silikonform erfolgen.

## **5 Zusammenfassung**

In diesem Beitrag wurden die Kosten für generativ gefertigte AM wie sie im Vakuum-Differenzdruck-Gießen genutzt werden erarbeitet und gegenübergestellt. Außerdem erfolgte mithilfe der zuvor berechneten Kostenstruktur für die Herstellung der AM mit einer Silikonform, die Veranschaulichung der Kosteneinsparung durch Break-even-Points.

Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass durch die Hohlbauweise die Kosten für das erste Ausbrennmodell von 427 € auf 239 € reduziert werden. Da sich die Reduzierung der Kosten stärker durch die Druckzeiterparnis als durch die Materialersparnis ergibt, sind fallende Skalenerträge zu verzeichnen. Bei der Nutzung von massiven AM ist es bis zu einer benötigten Stückzahl von 4 am wirtschaftlichsten diese generativ zu fertigen. Ab 5 AM lohnt sich die Erstellung der Silikonform. Dank der Hohlbauweise verschiebt sich der Break-even-Point mit dem Kostenverlauf der Silikonform auf 7,99 Stück. D. h., dass es bis 7 Stück kostengünstiger ist die AM generativ zu fertigen und ab 8 Ausschmelzmodellen eine Silikonform zur Herstellung zu nutzen.

Ferner sei an dieser Stelle nochmals daraufhin gewiesen, dass die Kostenverläufe, und Break-even-Points nur für die betrachteten Zylinder unter den genannten Randbedingungen gelten. Für andere Körper und abweichende Verfahren sind die Kosten neu zu berechnen.

## Literatur

- [1] Aue, H., Blank, W., Feikus, F., Finke, D., Gottschalk, J., Hanke, K., Hippler, P., Jahn, Dr. J., Knaus, J., Kohlgrüber, K., Präfke, K., Schädlich-Stubenrauch, J.: Feinguss: Herstellung - Eigenschaften - Anwendung. Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie, Düsseldorf, 2011.
- [2] MK Technology GmbH: Wie funktioniert Feinguss?, MK Technology GmbH, Grafschaft, [http://www.mk-technology.com/feinguss\\_funktion.html?&L=0](http://www.mk-technology.com/feinguss_funktion.html?&L=0) (24.04.2014).
- [3] Leotech Rapid Prototyping und Werkzeugbau GmbH: Metallguss im Vakuum-Differenzdruckguss-Verfahren: Wir bringen Ihre Idee in Form!, Leotech Rapid Prototyping und Werkzeugbau GmbH, Leonberg-Höfingen, <http://www.leotech.de/Metallguss.pdf> (25.04.2014).
- [4] 1zu1 Prototypen GmbH: 1zu1 Prototypen - Metallguss im Vakuum Differenzdruck Verfahren, <http://www.1zu1prototypen.com/metall/metallguss-verfahren.htm> (09.01.2014).
- [5] RTC RapidTechnologies GmbH: Bestellformular Material-Optionen Objet-Eden, Mettmann, 2013.
- [6] Baukammer Berlin: Angemessene Stundensätze für ingenieurtechnische Leistungen: Merkblatt 7. Baukammer Berlin, Berlin, 2010.
- [7] Kuhlmann, K., Scheuschner, H., Behm, I.: Topologieoptimierung von Rapid-Prototyping-Bauteilen, Industrie Management, 2013, Jahrgang: 2013 (2/2013), Seite 53–57.
- [8] Horsch, J.: Kostenrechnung: Klassische und neue Methoden in der Unternehmenspraxis, 1. Aufl., Gabler, Wiesbaden, 2010.
- [9] Kuhlmann, K., Müller, F., Döring, J.: Stückzahlabhängige Kostenbetrachtung verschiedener Herstellverfahren für Ausschmelzmodelle beim Feinguss, in Magdeburger Maschinenbautage 2013, Effizienz, Präzision, Qualität.

## Methodische Integration von Mitarbeiterwissen in die Produktentwicklung

**Dr. rer. nat. Rosemarie Bot-Schulz MBA, Dr.-Ing. Ingo Schulz\***

Lehrbeauftragte Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt

E-Mail: r.b-s@t-online.de

\* SKF GmbH

Gunnar-Wester-Straße. 12, 97421 Schweinfurt

E-Mail: ingo.schulz@skf.com; Internet: <http://www.skf.de>

**Inhalt:** Produktentstehungsprozesse werden immer komplexer. Grundsätzlich besteht die Herausforderung darin, vielfältiges Wissen, welches durch die Mitarbeiter erworben wurde, in die Produktentwicklung mit einzubeziehen. In diesem Beitrag werden Methoden vorgestellt, die Mitarbeitern die Möglichkeit geben, ihr Erfahrungswissen einzubringen und damit zu einem qualitativ hochwertigen Produkt beizutragen. Hierbei werden drei bekannte Methoden der systematischen Produktentwicklung mit der Szenariotechnik sowie des Bayesianischen Theorems gezielt erweitert. Anhand von Beispielen aus dem wissensintensiven Bereich der Schleifscheibenentwicklung werden die Methoden erläutert.

**Abstract:** Product development processes are getting more and more complex. Today we have to face the challenge to integrate employee`s expert knowledge into new products. In this article methods are described that allow the integration of experience in product development processes to contribute to high quality products. Three well-known methods from systematic engineering design are shown and are extended by the Scenario-technique and Bayes` Theorem. The methods are explained with examples from the highly knowledge intensive field of the grinding wheel development.

**Stichwörter:** Produktentstehungsprozess, Produktentwicklung, Wissensbasierte Produktentwicklung, Bayesianisches Theorem, Morphologischer Kasten, Szenariotechnik, Fehler-Ursachen-Analyse

**Keywords:** Product development process, product development, knowledge based product development, Bayes` theorem, morphological box, scenario technique, root-cause-analysis

## 1 Einleitung

Folgt man der Wissenstreppe von North, besteht Wissen aus Informationen, ergänzt um deren Vernetzung [1]. Diese Vernetzung wird bestimmt durch den Kontext, die Erfahrungen und Erwartungen des ‚Vernetzenden‘. Der Rohstoff des ‚Wissens‘ sind damit Informationen, die ‚Veredelung‘ erfolgt durch Personen.

Die Umsetzung von ‚Wissensmanagement‘ basiert daher auf dem Rohstoff ‚Informationen‘ und benötigt in der Praxis häufig aufwändige Methoden oder IT-Systeme. Als Methoden zum Wissensaustausch werden z. B. ‚Lessons Learned‘, ‚Best Practice‘ oder ‚Story Telling‘-Ansätze genannt [2]. Diese Methoden erfordern die Dokumentation der Informationen sowie die nachfolgende ‚Wiederaneignung‘, d. h. ihre Aufnahme und Vernetzung zu ‚Wissen‘. Insbesondere im Rahmen des Projektmanagements soll diese Vorgehensweise dazu beitragen, Erfahrungswissen im Unternehmen zu verbreiten. Hierbei wird z. B. zwischen einem Publishing- und einem Collaboration-Ansatz unterschieden [3]. Allerdings wird auch hier darauf hingewiesen, dass ein geeignetes ‚Trägersystem‘ notwendig ist. In der Praxis erweisen sich solche Systeme, die mit den notwendigen Informationen gefüllt werden müssen, oft als schwerfällig.

Produktentwickler sind aber keine ‚Wissensmanager‘! Der zusätzliche Arbeitsaufwand, ‚Wissenssysteme‘ zu pflegen, oder sogar erst aufzubauen, kann von Entwicklern und Konstrukteuren nicht geleistet werden. Ihnen müssen Methoden zur Verfügung gestellt werden, die in ihrem Wesen das Nutzen von ‚Wissen‘ ermöglichen. In diesem Beitrag werden daher drei Methoden vorgestellt, die seit langem zum Handwerkszeug der Produktentwickler gehören. Durch eine kleine Erweiterung berücksichtigen sie gezielt und systematisch das vorhandene Wissen der Produktentwickler, anerkennen das jeweils eigene und nicht dokumentierbare Wissen um Zusammenhänge eines Jeden und verlassen dennoch nicht den Rahmen der systematischen Produktentwicklung.

Wesentlich für jede dieser Methoden ist, dass die erforderlichen Informationen zum einen durch die Diskussion des Themas explizit bereitgestellt, als auch durch den jeweiligen Produktentwickler implizit mitgebracht werden. Die methodische Unterstützung ermöglicht dann die Vernetzung dieser Information – im Kontext der Aufgabe und die Erfahrungen und Erwartungen der Produktentwickler berücksichtigend.

Als Beispiel für die Betrachtung der Methoden wird eine Produktentwicklung in der Schleifscheibenindustrie gewählt, einem sehr wissensabhängigen Produkt. Für die ver-

schiedenen Einsatzgebiete von Schleifscheiben und deren spezielle Anforderungen wird eine Vielzahl von unterschiedlichen Bindungen entwickelt. Das grundlegende Konzept der Schleifscheibenbindung ist dabei im Prinzip immer das gleiche, da die Bindung stets die Schleifkörner in Position halten soll, bis diese verschleifen. Danach sollen die Schleifkörner freigegeben werden. Die Porosität der Schleifscheibe dient dazu, z. B. Schleifspäne auszutragen und die Prozesswärme abzuführen.

## **2 Betrachtung der ausgewählten Methoden**

### **2.1 Wissensbasierte Produktentwicklung durch den szenario-unterstützten Morphologischen Kasten**

Der Morphologische Kasten nach Zwicky ist eine grundlegende Methode der Konstruktionsmethodik, um aufbauend auf einem ‚zu ordnenden Gesichtspunkt‘ ein möglichst großes Lösungsfeld aufzuspannen [4]. Die ordnenden Gesichtspunkte können z. B. Funktionen, Konstruktionselemente, o. ä. sein. Diese Vorgehensweise kann als das Zusammentragen von Informationen aufgefasst werden, das durch zahlreiche Kataloge unterstützt wird [4], [5], [6], [7]. Aus der Vielzahl möglicher Kombinationen von Lösungen für einzelne Gesichtspunkte werden dann geeignete Prinziplösungen für das betrachtete Gesamtproblem ausgewählt. Die wesentliche Aufgabe hierbei ist es, die optimale Prinziplösung zu erkennen – also unter Berücksichtigung des Kontexts, der Erfahrungen und Erwartungen die einzelnen Informationen miteinander zu vernetzen.

Als Hilfsmittel hierzu wird z. B. die Verträglichkeitsmatrix, auch Cross-Consistency-Assessment (CCA), genannt [4], [9]. Durch den Ausschluss von Parameterkombinationen kann die Anzahl der möglichen Kombinationen um bis zu 90 % reduziert werden. Nachteilig bleibt, dass aus den verbleibenden möglichen Kombinationen der Entwickler nach wie vor aufgrund seiner Intuition „gute“ Prinziplösungen auswählen muss. Häufig wird dies auch als die ‚Methode des scharfen Hinsehens‘ bezeichnet.

Um diese noch immer verbleibende methodische Lücke zu schließen und gleichzeitig das Erfahrungswissen der Produktentwickler systematisch zu nutzen, wird im Folgenden ein um die Szenariotechnik erweiterter Morphologischer Kasten vorgestellt. Gleichzeitig wird ihr Ablauf der konstruktionsmethodischen VDI-Richtlinie 2221 zugeordnet [8].

Grundsätzlich wird die ‚Morphologische Analyse‘ im Rahmen strategischer Untersuchungen zusammen mit der Szenariotechnik genutzt [9]. Auch Brink nutzt die Kombination

aus Morphologischem Kasten und Szenariotechnik für die Entwicklung von Produkt- und Technologiestrategien [10]. Hier geht es aber darum, die Szenariotechnik nutzbar zu machen für die operative Produktentwicklung, sodass dieser elementare Pfeiler der industriellen Leistungsfähigkeit effektiver und effizienter durchgeführt werden kann.

Nach Kosow und Gaßner wird „mithilfe der Szenario-Methodik [...] versucht, durch die Konstruktion von verschiedenen möglichen Zukünften Orientierungswissen zu generieren, um gegenwärtiges Handeln daran auszurichten“ [12]. Nach Gausemeier et al. zeichnet sich die Szenariotechnik besonders durch die Grundprinzipien „Multiple Zukunft“ und „Vernetztes Denken“ aus [11]. Typischerweise wird die Szenariotechnik in 5 Schritten durchgeführt (Abbildung 1), siehe auch z. B. [11], [12], [13]:



Abbildung 1: Die 5 Schritte der Szenariotechnik nach [13]

### **Die Verbindung von Morphologischem Kasten und Szenariotechnik zu einer wissenschaftsunterstützten Produktentwicklungsmethode**

Die Szenariofeld-Bestimmung, also die Festlegung der Zielsetzung des Szenarioprojekts, kann mit dem Arbeitsschritt ‚Klären und präzisieren der Aufgabenstellung‘ sowie dem ‚Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen‘ nach VDI 2221 gleichgesetzt werden. Hierbei werden die grundlegenden Rahmenbedingungen des Entwicklungsauftrags festgelegt sowie z. B. die Funktionen als zu ordnender Gesichtspunkt bestimmt, die die Zeilen des Morphologischen Kastens definieren.

Die Schlüsselfaktor-Identifikation und -Analyse entspricht dem ‚Suchen nach Lösungsprinzipien [...]‘. Mögliche Lösungen zur Umsetzung der einzelnen Funktionen werden ermittelt und in den Morphologischen Kasten jeweils in eine separate Spalte eingetragen. Die unterschiedlichen Lösungen können auch jeweils als eine konkrete Ausprägung der Funktion betrachtet werden.

Die Szenario-Generierung entspricht dem ‚Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen‘, wobei es hierbei um die Strukturen geht, die die Prinzipiellen Lösungen definieren. Die Erzeugung der möglichen Prinzipiellösungen erfolgt durch eine Konsistenz- oder

eine Wechselwirkungsanalyse [12]. Aufgrund der Komplexität dieser Vorgehensweise ist die Nutzung einer Software zu empfehlen. Eine Übersicht über verschiedene Produkte findet sich z. B. bei Steinmüller [13]. In den Abbildungen wurde die Software Szenoplan verwendet [14].

In der Konsistenzmatrix wird die Frage beantwortet, „inwieweit passen zwei Ausprägungen unterschiedlicher Funktionen zusammen?“ Dem Beispiel in Abbildung 2 kann z. B. entnommen werden, dass der Brand I sehr gut mit dem Porenbildner PB B zusammenpasst (2), wohingegen der Brand III dem Porenbildner PB B schadet (-2). Der Brand II ist neutral gegenüber den Porenbildner PB A und B (0). Auf diese Weise wird die gesamte Konsistenzmatrix von dem Entwicklungsteam basierend auf ihrem Erfahrungswissen ausgefüllt.

The image shows two windows from the 'Szenoplan' software. The top window, titled 'Deskriptoren', contains a tree view on the left with categories: 'Schneide bereitstellen' (Korn A, Korn B, Korn C), 'Poren bilden' (PB A, PB B), and 'Schleifscheibe brennen' (Brand I, Brand II, Brand III). The right side of this window shows a form for 'Schneide bereitstellen' with 'Ausprägungen' (Korn A, Korn B, Korn C) and 'A Priori' values (all 0,33). The bottom window, titled 'Konsistenz-Matrix', has buttons for 'Matrix speichern', 'Export nach Excel', 'Hilfe', 'OK', 'Werte aus CI-Matrix übernehmen', 'Beschreibungen..', and 'Eingabe-Assistent...'. It displays a table with the following data:

|                        |           | Schneidebereitstellen |        |        | Poren bilden |      | Schleifscheibe brennen |          |           |
|------------------------|-----------|-----------------------|--------|--------|--------------|------|------------------------|----------|-----------|
|                        |           | Korn A                | Korn B | Korn C | PB A         | PB B | Brand I                | Brand II | Brand III |
| Schneidebereitsteller  | Korn A    | -                     | -      | -      | -            | -    | -                      | -        | -         |
|                        | Korn B    | -                     | -      | -      | -            | -    | -                      | -        | -         |
|                        | Korn C    | -                     | -      | -      | -            | -    | -                      | -        | -         |
| Poren bilden           | PB A      | -2                    | 2      | 2      | -            | -    | -                      | -        | -         |
|                        | PB B      | 2                     | 0      | -1     | -            | -    | -                      | -        | -         |
| Schleifscheibe brennen | Brand I   | 2                     | 2      | 2      | 2            | 2    | -                      | -        | -         |
|                        | Brand II  | 2                     | 1      | 0      | 0            | 0    | -                      | -        | -         |
|                        | Brand III | 1                     | -1     | -2     | 0            | -2   |                        |          | -         |

At the bottom of the 'Konsistenz-Matrix' window, it says 'Keine Eingabe möglich'.

Abbildung 2: Konsistenzmatrix zur Bestimmung des Verhaltens von Komponentenausprägungen  
(Deskriptor = ordnender Gesichtspunkt)

Der Algorithmus der Szenariosoftware berechnet nun, welche Kombinationen von Ausprägungen ein hohes Konsistenzmaß besitzen, d. h., welche Kombinationen gut zusammenpassen. Für das Beispiel sieht man in Abbildung 3, dass es insgesamt 3 Szenarien bzw. Lösungskombinationen gibt, die ein größtmögliches Konsistenzmaß erreichen.

Der Szenario-Transfer entspricht den nachfolgenden Schritten nach VDI 2221, dem Gliedern und Gestalten von Modulen sowie des gesamten Produkts. Die Basis hierfür bilden die durch die Szenariotechnik gefundenen konsistenten Prinzipiellösungen. Mit diesen drei Lösungskombinationen aus Abbildung 3 kann nun der Entwicklungsprozess fortgesetzt werden, indem sie beurteilt und ausgewählt werden.

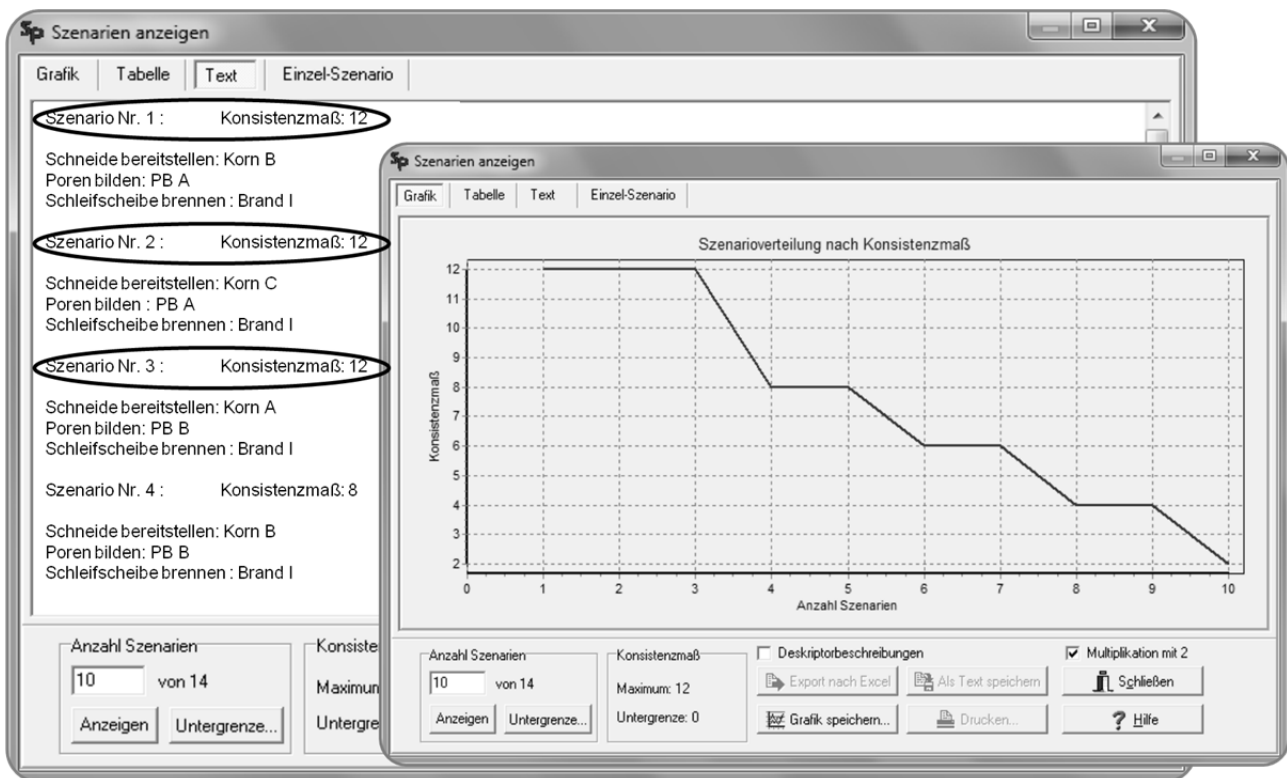


Abbildung 3: Lösungskombinationen bzw. Szenarien mit dem größtmöglichen Konsistenzmaß

## 2.2 Wissensbasierte Auswahlmethode auf Basis des Theorems nach Bayes

Konventionelle Methoden zur Bewertung und Beurteilung von Alternativen, wie z. B. die Nutzwertanalyse der Konstruktionsmethodik, legen das Hauptaugenmerk der Auswahl einer Alternative auf die Diskussion im Vorfeld definierter Zielgrößen [4]. Dies ermöglicht grundsätzlich einen objektiven Auswahlprozess, wird allerdings der Integration von Erfahrungswissen nur zu einem Teil gerecht. Zwei grundsätzliche Kritikpunkte an diesen Me-



thoden sind, 1) dass einzelne Informationen bewerten, und nicht deren Interaktion berücksichtigen, und 2) dass sie immer nur eine Teilmenge an Informationen berücksichtigen.

Durch eine modifizierte Auswahlmethode, inspiriert durch das Bayes'sche Theorem zur Beurteilung von Hypothesen mithilfe der Theorie der bedingten Wahrscheinlichkeit, wird dagegen das Erfahrungswissen der Produktentwickler genutzt [15].

Die folgende Gleichung 1 drückt die Wahrscheinlichkeit  $p$  aus, dass die Prinzipiellösung oder auch Alternative  $a$  die Zielgrößen  $z$  zu erfüllen vermag.

$$p\left(\frac{a}{z}\right) = \left(1 + \left(p_{a,a} \cdot \frac{1}{n_z} \cdot \sum (p_{e,z} \cdot g)\right)^{-1}\right)^{-1} = \left(1 + \left(\frac{\sum a_i}{\sum a} \cdot \frac{1}{n_z} \cdot \sum \left(\frac{\sum a_{i,z}}{\sum a_z} \cdot g\right)\right)^{-1}\right)^{-1} \quad (1)$$

Hierbei ist  $p_{a,a}$  die Anfangswahrscheinlichkeit einer Alternative  $a$ .  $p_{e,z}$  ist die Erwartbarkeit der Erfüllung der Zielgröße  $z$  auf der Grundlage der Alternative  $a$ .  $n_z$  ist die Anzahl der Zielgrößen,  $g$  die Gewichtung der einzelnen Zielgrößen. Zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten wird die Präferenzmatrix eingesetzt.

Die Anfangswahrscheinlichkeit  $p_{a,a}$  ist ein Maß für das implizite Wissen der Produktentwickler. Durch sie wird ausgedrückt, wie wahrscheinlich die Eignung einer Alternative ist, basierend auf den Erfahrungen und dem Hintergrundwissen der Entwickler – nicht basierend auf den Zielgrößen. Durch die ausdrückliche Berücksichtigung dieses impliziten Wissens wird ein ganzheitliches Urteil über die Konzepte gebildet. Hierdurch können insbesondere Aspekte, die nicht durch Zielgrößen abzubilden sind, mit in die Beurteilung einfließen. Für das in Kapitel 2.1 begonnene Beispiel mit 3 möglichen Lösungskombinationen zeigt Abbildung 4 die Berechnung der Anfangswahrscheinlichkeit mit der Präferenzmatrix. Die „Neutral“-Zeile ist aus mathematischen Gründen eingefügt, um eine Division durch Null zu vermeiden.

Durch die Erwartbarkeit  $p_{e,z}$ , die auf den Zielgrößen beruht, werden dagegen insbesondere Aspekte des expliziten Wissens berücksichtigt. Sie kann als der Grad des Erfüllens der Zielgröße durch die entsprechende Alternative gedeutet werden. Damit repräsentiert sie die bereits erprobten Vorgehensweisen, z. B. der Nutzwertanalyse. Abbildung 4 zeigt die Bewertung der drei Lösungskombinationen hinsichtlich der potenziellen Maßhaltigkeit, Steifigkeit und Festigkeit.

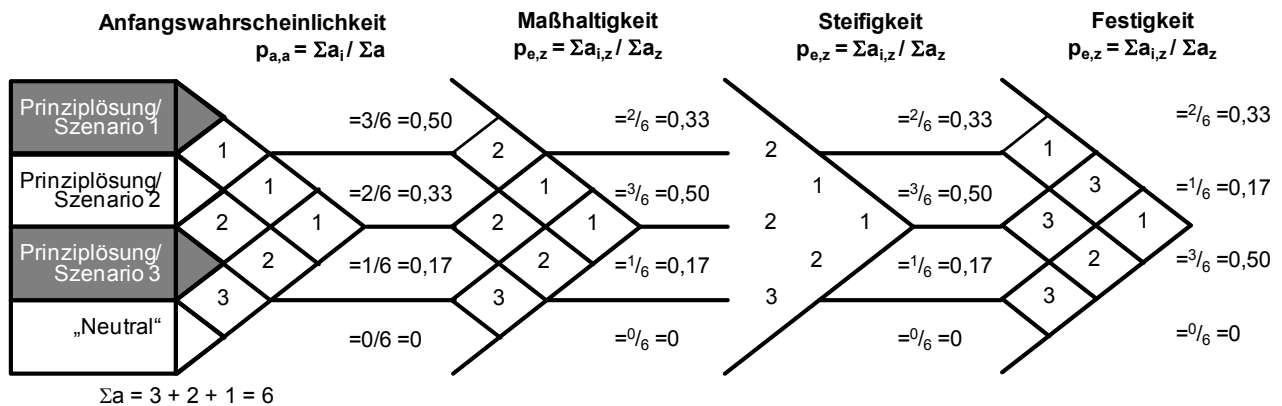


Abbildung 4: Bestimmung der Anfangswahrscheinlichkeit  $p_{a,a}$  und der Erwartbarkeiten  $p_{e,z}$

Führt man nun die einzelnen Wahrscheinlichkeiten durch Gleichung 1 zusammen, ergibt sich die in Abbildung 5 dargestellte Rangfolge. Diese Rangfolge repräsentiert zum einen das Erfahrungswissen, das ‚Bauchgefühl‘ der Entwicklungsingenieure bezogen auf das gesamte Produkt. Zum anderen integriert es aber auch die bewährten zielgrößenorientierten Auswahlverfahren wie die Nutzwertanalyse.

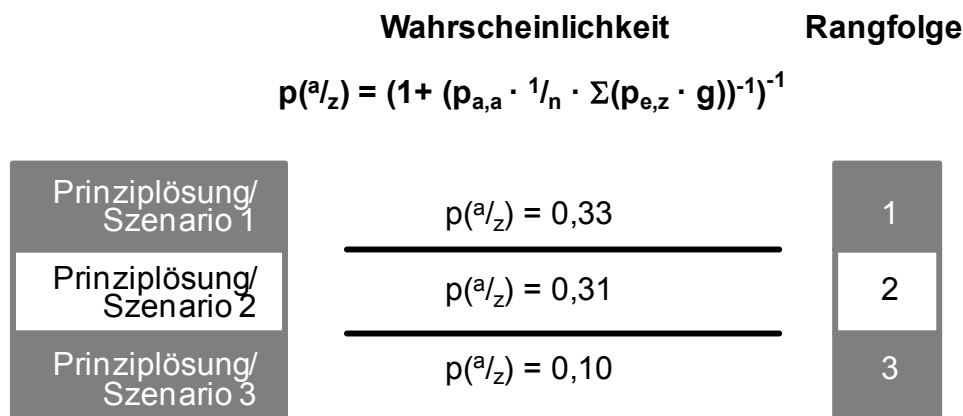


Abbildung 5: Rangfolge der Prinziplösungen

## 2.3 Wissensbasierte szenario-unterstützte Fehler-Ursachen-Analyse

Die Fehler-Ursachen-Analyse gehört zu den wesentlichen Instrumenten, um im Fall von unvorhergesehenem, ungewolltem Produktverhalten dessen Ursache zu ermitteln. Hierbei geht man davon aus, dass ausgehend von der wirklichen oder wahrscheinlichsten Ursache effektive Verbesserungsmaßnahmen ermittelt werden können. Gebräuchliche Methoden hierfür sind z. B. das Fischgrät- oder Ischikawa-Diagramm, die Fehlerbaumanalyse oder auch die Fehler-Möglichkeit-und-Einfluss-Analyse [4], [16].

Die Praxis zeigt, dass häufig entweder 1) die Wirkung von der Kombination verschiedener Ursachen erzeugt wird oder 2) die wirkliche, einzelne Ursache nicht von den anderen möglichen Ursachen getrennt werden kann, sodass mit einer Menge von potentiellen Ursachen gearbeitet werden muss. Die Herausforderung besteht darin, ein Bündel von Ursachen zu bestimmen, welches in sich ‚passend‘ oder ‚konsistent‘ ist. Wie sich leicht erkennen lässt, handelt es sich auch hierbei um eine Aufgabe, die durch den szenario-unterstützten Morphologischen Kasten bewältigt werden kann.

Wurden durch die Anwendung von bewährten Fehler-Ursachen-Analysen verschiedene mögliche Ursachen identifiziert, können diese in einem morphologischen Kasten zusammen geführt werden. Für jede Ursache werden unterschiedliche, mögliche Ausprägungen festgelegt. Falls in einem Schadensfall z. B. eine fehlerhafte Temperatur beim Brand der Schleifscheibe als mögliche Ursache in Frage kommt, können die Ausprägungen ‚Temperatur zu hoch‘ und ‚Temperatur zu niedrig‘ sein. Mit Hilfe der Szenario-Methodik können die Ausprägungen der Temperatur und weiterer möglicher Ursachen zu wahrscheinlichen Fehler-Bündeln zusammen gefasst werden. Die Vorgehensweise ist identisch mit der in Kapitel 2.1 beschriebenen. Damit ergibt sich zugleich der wesentliche Vorteil, dass die Produktentwickler nicht unterschiedliche Methoden erlernen müssen.

### **3 Erfahrungen aus der Praxis**

Bei der Anwendung der beschriebenen Methoden zeigte sich immer eins: Die beteiligten Produktentwickler reagierten sehr positiv auf die direkte Frage nach ihrem Wissen, beteiligten sich sehr konstruktiv an den Diskussionen und akzeptierten die abschließende Entscheidung. Dies ist umso bemerkenswerter, als viele praktisch tätige Produktentwickler den Methoden der systematischen Produktentwicklung recht ablehnend gegenüberstehen.

Basierend auf diesen positiven Erfahrungen in der Praxis sollten Methoden der Produktentwicklung grundsätzlich hinsichtlich ihrer Vollständigkeit in Bezug auf die Wissensnutzung überprüft werden. Wissensmanagement ist keine ‚Managementübung‘, die parallel zu den operativen Notwendigkeiten in einem Unternehmen durchgeführt werden sollte. Wissensmanagement muss bei der täglichen Arbeit der Produktentwickler umgesetzt werden. Im Zentrum dieses Wissensmanagements steht die Quelle des Wissens – die beteiligten Personen.

## Literatur

- [1] North, Klaus: *Wissensorientierte Unternehmensführung – Wertschöpfung durch Wissen*. Wiesbaden: Gabler, 2002. – ISBN 3-409-33029-1
- [2] Lehner, Franz: *Wissensmanagement – Grundlagen, Methoden und technische Unterstützung*. München: Carl Hanser Verlag, 2006. – ISBN 3-446-21933-1
- [3] Gessler, Michael (Hrsg.): *Kompetenzbasiertes Projektmanagement (PM3) – Handbuch für die Projektarbeit, Qualifizierung und Zertifizierung*. Nürnberg: GPM Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement e. V., 2011. – ISBN 978-3-924841-40-9
- [4] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-34060-7
- [5] Koller, Rudolf: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau*. 3. Aufl. Berlin: Springer, 1998. – ISBN 3-540-63037-6
- [6] Koller, Rudolf; Kastrup, Norbert: *Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1998. – ISBN 978-3-540-63060-9
- [7] Roth, Karlheinz.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen : Band 1; Konstruktionslehre*. Berlin: Springer, 2000. – ISBN 978-3-540-67142-8
- [8] VDI 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Berlin: Beuth, 1993.
- [9] Ritchey, Tom: *Problem structuring using computer-aided morphological analysis*. Journal of the Operational Research Society, 2006.
- [10] Brink, Volker: *Verfahren zur Entwicklung konsistenter Produkt- und Technologiestrategien*. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 2010. – ISBN 978-3-939350-99-6
- [11] Gausemeier, Jürgen; Plass, Christoph; Wenzelmann, Christoph: *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung - Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*. München: Hanser, 2009. – ISBN-13 978-3446410558
- [12] Kosow, H.; Gaßner, R.: *Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse - Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien*. Berlin: Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung IZT, 2008. – ISBN 978-3-941374-03-4
- [13] Steinmüller, K.; Schulz-Montag, B.: *Szenarien - Instrumente für Innovation und Strategiebildung*. Essen: Z\_punkt GmbH, 2003.
- [14] *Szeno-Plan*. Braunschweig: SINUS Software und Consulting GmbH, [www.sinus-online.com](http://www.sinus-online.com), 2011.
- [15] Schulz, Ingo; Bot-Schulz, Rosemarie: *Bayes' Theorem als Grundlage der Alternativenauswahl in der Produktentwicklung*. Konstruktion, Nr. 11/12, S. 63-66, 2010.
- [16] Brunner, Franz; Wagner, Karl: *Taschenbuch Qualitätsmanagement*. München: Hanser, 2008. – ISBN 978-3-446-41666-6

# Eine Methode zur Anpassung von Prüfumgebungen für Wirkungsgraduntersuchungen an Hochdrehzahlgetrieben

Albert Albers, Friedrich Brezger, Uwe Reichert

IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kaiserstraße 10, 76131 Karlsruhe

E-Mail: uwe.reichert@kit.edu; Internet: <http://www.ipek.kit.edu>

**Inhalt:** Die Entwicklung von Elektrofahrzeugen stellt die Ingenieure bei der Erprobung einzelner Antriebsstrangkomponenten auf Prüfumgebungen aufgrund des Drehzahlbereichs bis 20'000 U/min vor Herausforderungen. Diese ist u. a. begründet in der auftretenden Schwingungsanregung. Ein konventioneller Prüfaufbau für Antriebsstrangkomponenten von Verbrennungsfahrzeugen stößt dabei an seine Leistungsgrenzen. Somit ergibt sich die Fragestellung bezüglich der richtigen Anpassung einer Prüfumgebung, beispielsweise für eine genaue Wirkungsgraduntersuchung für den Hochdrehzahlbereich.

Im vorliegenden Paper wird mittels des am IPEK entwickelten C&C<sup>2</sup>-Ansatzes eine konventionell aufgebaute Prüfumgebung für Verbrennungsfahrzeuge bezüglich des Zusammenhangs von Funktion und Gestalt analysiert. Am Beispiel auftretender Schwingungen werden hierfür die kritischen Bauteile identifiziert und durch eine Synthese in eine neue Gestalt überführt, wodurch die am Prüfaufbau auftretenden Schwingungen deutlich reduziert werden können.

**Abstract:** The development of electric vehicles confronts the engineers with challenges by testing single drive train components on test benches, because of the rotational speed range of 20'000 rpm. Amongst others, the resulting challenge is in the occurrent oscillation excitation. A conventional mounting arrangement for tests for drive train components of cars with combustion engine doesn't reach the necessary performance limit. Consequently, the question is how to correctly conform a test bench, for example for an examination of the degree of efficiency for the high speed range.

In the present paper, by the IPEK developed C&C<sup>2</sup>-Approach, a conventionally built test bench for cars with combustion engine is analyzed respective the context of function and form. Using the example of appearing oscillations, therefor the critically component parts are identified and through a synthesis in a new form transformed, whereby the appearing oscillations on the test bench can explicit be reduced.

**Stichwörter:** Methodik, Prüfumgebung, Hochdrehzahlgetriebe, Wirkungsgraduntersuchung

**Keywords:** methodology, test bench, high-speed-engine gear box, examination of the degree of efficiency

## 1 Motivation und Zielsetzung

Der Anteil an Elektrofahrzeugen auf dem globalen Automobilmarkt hat sich in den letzten Jahren deutlich erhöht [1]. Aufgrund der Ressourcenknappheit an fossilen Brennstoffen und dem damit verbundenen Preisanstieg werden in naher Zukunft Elektrofahrzeuge einen noch größeren Anteil bei den Neuzulassungen erreichen. Hierfür ist es unter anderem notwendig, die Kundenforderungen an eine ausreichende Reichweite der Elektrofahrzeuge durch die Automobilhersteller zu bedienen [1]. Neben der Entwicklung von leistungsfähigeren Batteriesystemen arbeiten die Automobilhersteller an effizienteren Antriebssträngen, um den Wirkungsgrad zu verbessern und dadurch die Reichweite der Fahrzeuge zu erhöhen. Hierfür ist es notwendig, einzelne Komponenten des Antriebsstrangs auf dafür geeigneten Prüfumgebungen zu untersuchen.

In diesem Beitrag wird eine Methodik zur Anpassung einer konventionellen Prüfumgebung für Antriebsstrangkomponenten eines Verbrennungsfahrzeugs an die neuen Randbedingungen einer Prüfumgebung für Elektrofahrzeuge vorgestellt. Im Mittelpunkt steht hierbei die Anpassung des Antriebsstrangs zwischen dem Antriebsmotor und der Antriebsstrangkomponente, da dieser bei Prüfumgebungen für Elektrofahrzeuge deutlich höheren Drehzahlen ausgesetzt ist. Die Methode wird beispielhaft an einer auftretenden Schwingungsproblematik bei der Wirkungsgraduntersuchung eines Differentials für Elektrofahrzeuge angewandt.

## 2 Stand der Technik

Um einzelne Antriebsstrangkomponenten von Fahrzeugen auf Prüfumgebungen untersuchen zu können, müssen diese mittels geeigneter Verbindungselemente mit dem Antriebsmotor gekoppelt werden. Diese Verbindung besteht in der Regel nicht ausschließlich aus einem starren Einzelteil, welches den Antriebsmotor drehfest mit dem Eintrieb der Komponente verbindet. Vielmehr wird bei der Ermittlung des Wirkungsgrades das Drehmoment am Aus- und Eingang der Antriebsstrangkomponente mittels Drehmomentmessnaben gemessen. Die Drehmomentmessung erfordert eine sehr genaue Ausrichtung des Antriebsmotors zur Antriebsstrangkomponente, damit eine möglichst kleine Biegebelastung an der Messnabe vorliegt. Abbildung 1 zeigt beispielhaft den am IPEK - Institut für

Produktentwicklung angewendeten Antriebsflansch zur Untersuchung einer Antriebsstrangkomponente eines Verbrennungsfahrzeugs mit Drehzahlen bis maximal 7000 U/min.

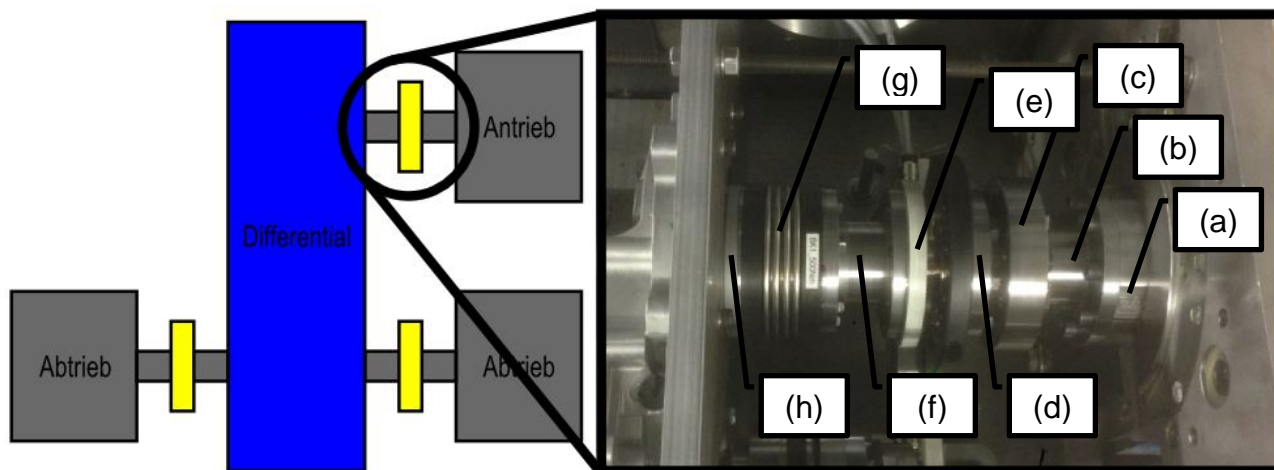


Abbildung 1: Aufbau eines Antriebsstrangs für Drehzahlen bis 7000 U/min

Zwischen der Ausgangswelle des Elektromotors (a) und einer Drehmomentmessnabe (e) zur Messung des Eingangsrehmoments befinden sich zwei Flansche (b) (d), die über ein Ringspannelement (c) miteinander verbunden sind. Die beiden Flansche gleichen einerseits die unterschiedlichen Flanschbilder des Motors und der Messnabe, sowie den Längenversatz aufgrund der Anordnung des Abtriebs der Antriebsstrangkomponente aus. Um eine querkräftfrei Messung des Drehmoments [2] zu gewährleisten und darüber hinaus einen Achs – oder Winkelversatz ausgleichen zu können, ist eine Balgkupplung (g) mittels eines Adapterflansches (f) an die Messnabe geschraubt. Die Drehmomentübertragung von dem Antriebsstrang auf den Prüfling erfolgt mittels eines Flanschs mit Innenverzahnung (h), der in das Gegenstück am Eintrieb der Antriebsstrangkomponente eingreift.

Bei Prüfungen für Antriebsstrangkomponenten von Elektrofahrzeugen ist ein Drehzahlbereich von bis zu 7000 U/min nicht ausreichend. Aufgrund der hohen Drehzahlen der Elektromotoren müssen die Prüfungen für Drehzahlen bis 20'000 U/min angepasst werden. Aufgrund der Vielzahl an Verbindungselementen in einem konventionellen Antriebsstrang und den damit verbundenen Ungenauigkeiten kann es bei Drehzahlen von bis zu 20'000 U/min zu Schwingungen kommen, die Schäden an den Prüfstandskomponenten verursachen können. Abbildung 2 zeigt das Schwingungsverhalten für den in Abbildung 1 dargestellten Antriebsflansch.

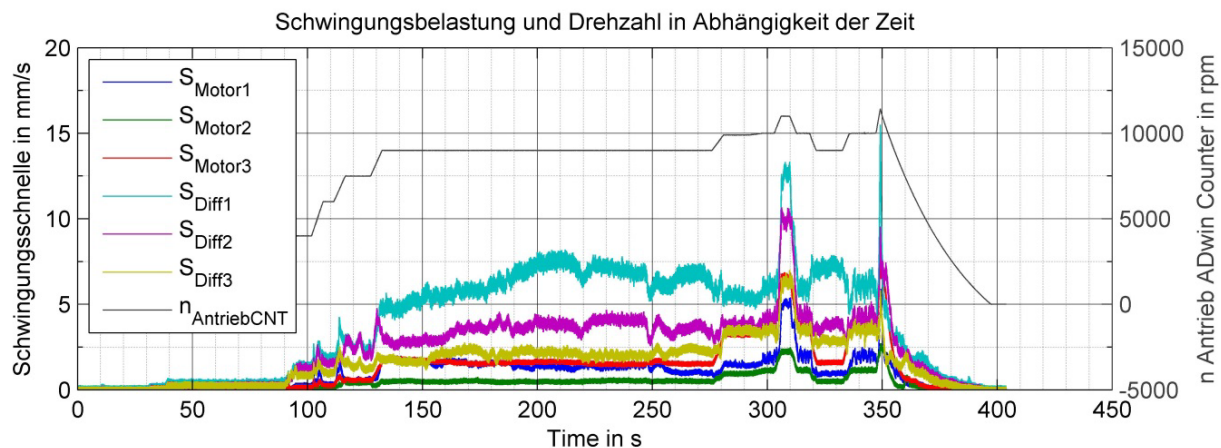


Abbildung 2: Schwingungsverhalten eines konventionellen Aufbaus für einen Antriebsstrang

Die Schwingungen werden mit jeweils drei Beschleunigungsaufnehmern am Gehäuse nahe den beiden Enden des Antriebsflansches (Abbildung 1) gemessen. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei einer Drehzahl von 7500 U/min die Schwingungen stark zunehmen. Bei einer Drehzahl von 11'000 U/min wird der Prüflauf aufgrund der Schwingungen abgebrochen, um Schäden an dem Antriebsmotor und der Antriebsstrangkomponente zu vermeiden. Deshalb ist es zwingend notwendig, den Antriebsstrang konstruktiv an höhere Drehzahlen anzupassen.

Das IPEK – Institut für Produktentwicklung verfügt über eine „eDrive in the loop“ Prüfumgebung, kurz eDril, mit der sowohl Antriebsstrangkomponenten von Verbrennungsfahrzeugen, als auch von Elektrofahrzeugen simuliert werden können (Abbildung 3).

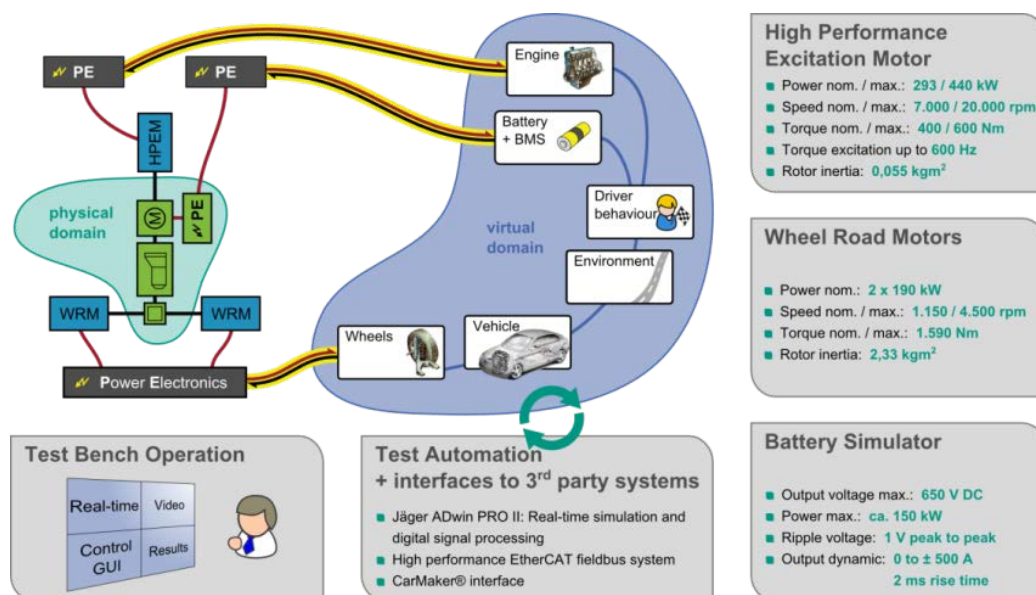


Abbildung 3: eDril Prüfumgebung: Schematische Darstellung & technische Daten



Mit dieser Prüfumgebung und des X-in-the-Loop-Ansatzes (XiL) [3] lassen sich beliebige Antriebsstrangkomponenten, das System Under Development (SUD), mit einer geeigneten Restsystemsimulation immer im Gesamtsystemkontext sowie den Fahrer- und Umgebungswechselwirkungen validieren. Speziell für die Antriebsstrangkomponenten von Elektrofahrzeugen verfügt der Antriebsmotor über einen Drehzahlbereich bis 20'000 U/min, sowie einen schwingungsoptimierten Unterbau. Um Mess- und Steuerdaten in Echtzeit sicher übertragen zu können, sind Automatisierung-, Mess- und Leistungselektronik mit einer EtherCAT-Schnittstelle ausgerüstet. Dieses Bussystem ermöglicht den Austausch von bis zu 200 Signalen mit 16bit-Auflösung bei einer Übertragungsrate von 20kHz [4].

Je nach Anforderungen muss der Antriebsflansch an diesen Drehzahlbereich angepasst werden. Prinzipiell gibt es Möglichkeiten wie gedämpfte Klauenkupplungen zur Minimierung der Schwingungen, doch zunächst soll die Anpassung des Antriebsflansches mittels des C&C<sup>2</sup>-Ansatzes [5] analysiert werden. Dabei wird ein technisches System innerhalb der Systemgrenze, welche an ein geeignetes Abstraktionsniveau angepasst werden muss, durch Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen beschrieben. Wirkflächenpaare werden aus zwei Wirkflächen gebildet, die in Wirkkontakt stehen und in denen Kräfte, Energie, Stoff und/oder Information übertragen werden. Leitstützstrukturen sind gestaltungsrelevante Volumina, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden und eine Leitung von Kräften, Energie, Stoff und/oder Information zwischen den WFP ermöglichen. Wirkungsrelevante Eigenschaften, die außerhalb des Betrachtungsbereichs liegen, werden durch Connectoren in die Systembetrachtung integriert. Diese liegen nicht im betrachteten System und sind somit nicht im Gestaltungsraum.

### 3 Methodik

Bei dem C&C<sup>2</sup>-Ansatz handelt es sich um einen methodischen Ansatz, welcher zur Beschreibung der Funktion und Gestalt mechanischer Systeme auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen geeignet ist [5]. Zu Beginn der Analyse eines technischen Systems wird das zu untersuchende Teilsystem durch die Systemgrenze von dem Restsystem, welches die nicht betrachteten Teilsysteme abbildet, abgegrenzt. Die Systemgrenze wird je nach Abstraktionsgrad durch die Schnittstelle (WFP) zwischen Restsystem und dem zu untersuchenden technischen System gezogen. Das Restsystem wird durch die Connectoren

abgebildet (Abbildung 4). Am konkreten Beispiel des Antriebsstrangs bilden die Connectoren die Eigenschaften der Antriebsstrangkomponente und des Antriebsmotors ab. Der zu untersuchenden Antriebsstrang liegt innerhalb der Systemgrenze. Die Systemgrenze schließt die Eingangswelle der Antriebsstrangkomponente mit ein, weil diese ebenfalls dem Antriebsstrang zugeordnet wird.

Nach der Festlegung der Systemgrenze werden die einzelnen Wirkkontakte und Leitstützstrukturen identifiziert, die Kräfte, Energie, Stoff und/oder Information übertragen. In Abbildung 4 wird das Drehmoment über mehrere Wirkflächenpaare (WFP) und Leitstützstrukturen (LSS) von dem Antriebsmotor auf die Komponente übertragen. Jedes WFP und jede LSS erfüllen dabei unterschiedliche Aufgaben. In Abbildung 4 sind lediglich die Wirkflächenpaare zur Momentübertragung gekennzeichnet. Die Wirkflächenpaare zur Zentrierung und Verschraubung, liegen eine Abstraktionsebene tiefer und sind deshalb nicht dargestellt, müssen aber trotzdem berücksichtigt werden.

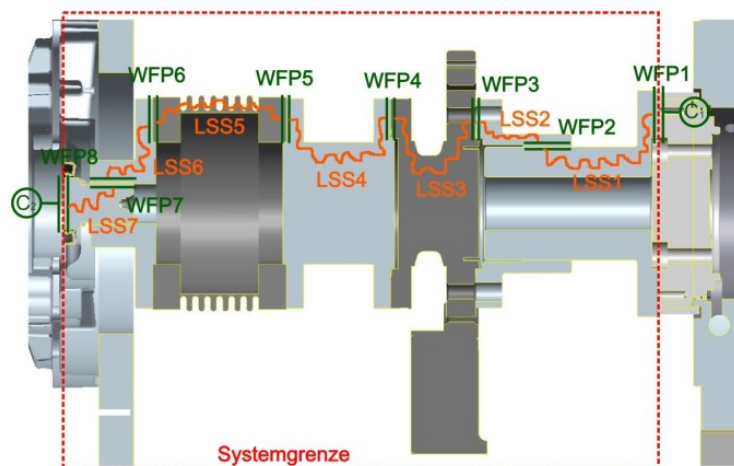


Abbildung 4: Systemgrenzen Antriebsstrang (ohne das Ringspannelement)

Nachdem alle Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen identifiziert wurden, werden diesen Eigenschaften und Wechselwirkungen, beispielsweise geometrische Eigenschaften oder die Art der Kraftübertragung, zugeordnet. Dies wird beispielhaft an ausgewählten Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen in Kapitel 4 durchgeführt. Durch die ganzheitliche Betrachtung des untersuchten Teilsystems mittels Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen können diese einer Eigenschaft oder einer Wechselwirkung entsprechend zugeordnet werden. Am Beispiel der Schwingungsanregung können dadurch die kritischen Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen identifiziert werden, die für die Anregung ursäch-

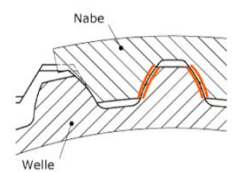
lich sind. Im letzten Schritt wird die Gestalt der Wirkflächenpaare gezielt verändert, um die Problematik der Schwingungsanregung zu verringern oder komplett zu eliminieren. Das würde den Wegfall oder die Veränderung der Gestalt eines Wirkflächenpaares oder einer Leitstützstruktur bedeuten, beispielsweise eine innenzentrierte Keilwelle mit hohen Genauigkeiten. Durch diese Methode kann die Konstruktion auf die notwendigen Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen reduziert werden, die zur Funktionserfüllung unter den geänderten Randbedingungen notwendig sind.

## 4 Ergebnisse

Mit Hilfe des C&C<sup>2</sup>-Ansatzes konnten alle Wirkflächenpaare und Leitstützsysteme des betrachteten Teilsystems identifiziert werden. Deren Eigenschaften und Wechselwirkungen werden den identifizierten Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen aus Abbildung 4 beispielhaft in Tabelle 1 und in Tabelle 2 zugeordnet. Dabei ist der Abstraktionsgrad entsprechend der Problemstellung zu wählen.

Tabelle 1: WFP 7: Passverzahnung


| <b>WFP 7: Passverzahnung</b>   |  |
|--|--|
| Wirkfläche a:<br>Außenverzahnte Passverzahnung (LSS 7) nach DIN5480  | Wirkfläche b:<br>Innenverzahnte Passverzahnung (LSS 6) nach DIN5480                  |
|   |  |
| Wechselwirkung:<br>Drehmomentübertragung von LSS 6 auf LSS 7   |  |
| Eigenschaften:<br>Spiel in der Passverzahnung aufgrund des flankenzentrierten Evolventenzahnprofils. Infolge der Zahnflankenstellung resultieren radiale Kräfte, welche die Nabe schwächen und das Spiel vergrößern [6]. |  |



Eine Analyse ergab, dass die Passverzahnung (WFP 7) aufgrund der flankenzentrierten Evolventenverzahnung spielbehaftet ist. Aufgrund der Bauform einer Balgkupplung

(LSS 5) rotieren die Wirkflächenpaare 5 und 6 nicht raumfest zueinander. Durch eine gesamte Betrachtung der Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen konnte eine unbestimmte Lagerung der LSS 6 unter anderem als Schwingungsquelle, insbesondere bei Drehzahlen über 7500 U/min, identifiziert werden.

Tabelle 2: LSS 5: Balgkupplung

| LSS 5: Balgkupplung   |  |
|---|--|
|  | <b>Wechselwirkung:</b><br>Drehmomentübertragung von WFP 5 auf WFP 6<br>Ausgleich von axialem Versatz und Winkelversatz von WFP 5 zu WFP 6  |
|   | <b>Eigenschaften:</b><br>Keine exakt definierte Position von WFP 6, WFP 7 und LSS 6 zu WFP 5<br>Masseneigenschaften: Masse: 1,8 kg, Trägheitsmoment: $3,4 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$ |

Dadurch lässt sich mittels der C&C<sup>2</sup>-Analyse durch die den Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen zugewiesenen Eigenschaften der Zusammenhang zum Schwingungsverhalten der technischen Mechanik herstellen. Mit Hilfe eines Ersatzmodells, der Lageinformationen der Wirkflächenpaare sowie den E-Modulen und Flächenträgheitsmomenten der Leitstützstrukturen lässt sich ein Schwingungsmodell ableiten, dass in Abhängigkeit der Reaktionskräfte die Querverschiebungen und Drehungen der Massen liefert [7]. Dieses ist in Abbildung 5 dargestellt.

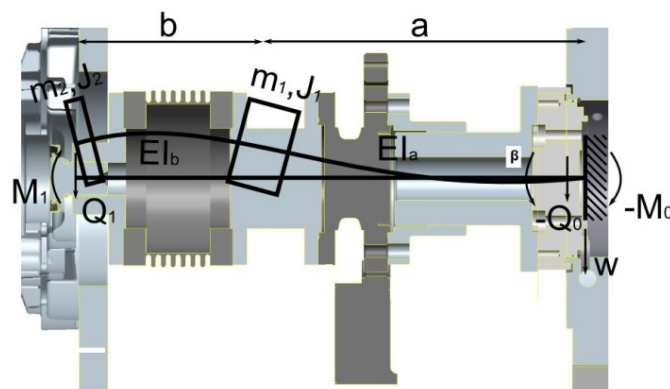


Abbildung 5: Schwingungsersatzmodell

Das zugehörige Gleichungssystem zu dem in Abbildung 5 dargestellten Schwingungsmodell ergibt sich zu:

$$\begin{bmatrix} -Q_0 \\ -M_0 \\ Q_1 \\ M_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3EI_a}{a^3} + \frac{12EI_b}{b^3} & \frac{3EI_a}{a^2} - \frac{6EI_b}{b^2} & -\frac{12EI_b}{b^3} & -\frac{6EI_b}{b^2} \\ \frac{3EI_a}{a^2} - \frac{6EI_b}{b^2} & \frac{3EI_a}{a} + \frac{4EI_b}{b} & \frac{6EI_b}{b^2} & \frac{2EI_b}{b} \\ -\frac{12EI_b}{b^3} & \frac{6EI_b}{b^2} & \frac{12EI_b}{b^3} & \frac{6EI_b}{b^2} \\ -\frac{6EI_b}{b^2} & \frac{2EI_b}{b} & \frac{6EI_b}{b^2} & \frac{4EI_b}{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ \beta_1 \\ w_2 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$$

Hierdurch können die Verschiebungen und Drehungen der beiden Massen in Abhängigkeit der Reaktionskräfte und Momente ermittelt werden. Daraus lassen sich Aussagen über das Schwingverhalten sowie die maximale Auslenkung des Antriebsstrangs treffen.

Des Weiteren konnte durch die Analyse und die gesamtheitliche Betrachtung der Wirkflächenpaare 1 bis 3 und der Leitstützstrukturen 1 und 2 ein Höhengschlag von LSS 3 und LSS 4 festgestellt werden, der ebenfalls für die Schwingungsanregung bei höheren Drehzahlen verantwortlich ist. Aufgrund dieser Erkenntnisse konnten die relevanten Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen durch eine gezielte Abänderung der Gestalt angepasst, oder komplett eliminiert werden. Die schwingungsoptimierte Konstruktion des Antriebsstrangs ist in Abbildung 6 dargestellt.

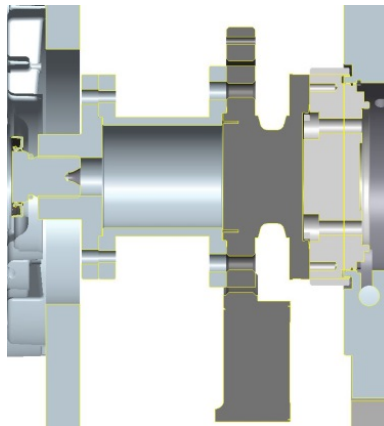


Abbildung 6: schwingungsoptimierter Antriebsstrang

Die Wirkflächenpaare 2,3 und 6 sowie die Leitstützstrukturen 1,2 und 5 aus Abbildung 4 konnten eliminiert werden, wodurch ein schwingungsoptimierter Antriebsstrang abgeleitet werden konnte. Der Längenausgleich von LSS 1 und 2 erfolgt in der geänderten Konstruktion durch die geänderte Ausrichtung des Abtriebsmotors. Den Ausgleich des Wellenversatzes wird in der neuen Konstruktion durch die spielbehaftete Passverzahnung

(WFP 7) in Kombination mit einer genaueren Ausrichtung der Antriebswelle durchgeführt. Dadurch ist eine querkräftfreie Messung des Drehmoments möglich.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe des C&C<sup>2</sup>-Ansatzes konnte am Beispiel der Schwingungsanregung gezeigt werden, dass konventionelle Antriebsstränge im Drehzahlbereich bis 7500 U/min zur Wirkungsgradmessung an die neuen Randbedingungen von Elektrofahrzeugen angepasst werden können. Hierfür müssen nach der Festlegung der Systemgrenze sämtliche Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen zur Erfüllung einer Funktion identifiziert werden. Nach der Bestimmung derer Eigenschaften und Wechselwirkungen sowie der ganzheitlichen Betrachtung des zu untersuchenden Teilsystems konnten die kritischen Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen identifiziert und deren Gestalt abgeändert oder komplett eliminiert werden.

Im nächsten Schritt muss der schwingungsoptimierte Aufbau des Antriebsstrangs physisch umgesetzt und aufgebaut werden. Nach der Ausrüstung mit Beschleunigungsaufnehmern sind erneut Schwingungsmessungen durchzuführen um den schwingungsoptimierten Antriebsstrang durch Versuche validieren zu können.

## Literatur

- [1] Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien. Auf: <http://www.iwr.de/news.php?id=25321>, abgerufen am 26.08.2014
- [2] Montageanleitung Drehmomentmessflansch T40B, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 2014
- [3] Düser, T.; *X-in-the-Loop, ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen*, Universität Karlsruhe, Institut für Produktentwicklung, Dissertation, 2010
- [4] Beckhoff Gesamtkatalog 2014. Auf <http://www.beckhoff.de> abgerufen am 26.08.2014
- [5] Albers, Albert; Wintergerst, Eike; *The Contact and Channel Approach (C&C<sup>2</sup>-A) – relating a system's physical structure to its functionality*. [Buchverf.] A Chakrabarti und L Blessing. *An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations*. Bangalore: Springer-Verlag, 2014.
- [6] Berechnung einer Keilwellenverbindung. Auf: [http://diglib.ethz.ch/system/temporary/get\\_wnv.dsp9.search8.htm](http://diglib.ethz.ch/system/temporary/get_wnv.dsp9.search8.htm), abgerufen am 26.08.2014
- [7] R. Gasch; K. Knothe; R. Liebich; *Strukturdynamik*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2012 - ISBN: 978-3-540-88976-2,

## Varianten- und Komplexitätsmanagement für individualisierte Produkte

**Yousef Hooshmand, Peter Köhler, Andrea Korff-Krumm \***

Institut für Produkt Engineering, Universität Duisburg-Essen

Lothar Straße 1, 47057 Duisburg

E-Mail: yousef.hooshmand@uni-due.de; peter.koehler@uni-due.de; Internet: www.uni-due.de/cae

\* Siemens AG, Division E P CP

Wolfgang-Reuter-Platz 4, 47053 Duisburg

E-Mail: andrea.korff-krumm@siemens.com; Internet: www.siemens.com

**Inhalt:** Die rasch voranschreitenden technologischen Entwicklungen und der steigende Bedarf an Individualisierung haben in den letzten zwei Jahrzehnten die Komplexität sowohl der Produkte als auch der Produktentstehungsprozesse drastisch erhöht. Gleichzeitig zwingen die immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen und der zunehmende Wettbewerbsdruck die Unternehmen und insbesondere die Entwicklungsteams, schneller und innovativer auf Marktbedürfnisse zu reagieren. Die Situation verschärft sich, wenn die Entwicklungs- und Engineering-Teams global verteilt sind, sie aber auf gleiche Unternehmensdaten und das gleiche Unternehmenswissen zugreifen müssen.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, sind konstruktionstechnische und administrative Maßnahmen mit geeigneten informationstechnischen Ansätzen zu verbinden. Es gilt die wechselseitigen Abhängigkeiten der verschiedenen Disziplinen und Anforderungen entlang des gesamten Produktlebenszyklus zu erfassen und zu beherrschen. Dies ist für die Einzelfertigung von komplexen Produkten, die immer wieder auf Basis von kundenspezifischen Anforderungen neu ausgelegt oder teilweise neu entwickelt werden müssen, eine besondere Herausforderung.

Gegenstand dieses Beitrags ist die Entwicklung und Umsetzung eines Konzeptes zum Varianten- und Komplexitätsmanagement in der Einzelfertigung im Bereich der Strömungsmaschinen. Dies umfasst insbesondere den Aufbau einer unternehmensweiten Referenzstruktur als Basisbaustein des Konzepts, ein integriertes Variantenmanagement, das Änderungsmanagement und das Wissensmanagement, so dass auch eine nachhaltige Transparenzerhöhung in der Organisation erreicht werden kann. Das Konzept wurde im Rahmen eines gemeinsamen Projekts zwischen der Universität Duisburg-Essen und der Geschäftseinheit E P CP der Siemens AG entwickelt und umgesetzt. Es ist jedoch allgemeingültig und kann auf andere Unternehmen im Einzelfertigungsbereich übertragen werden.

**Abstract:** During last two decades, rapid technological developments and growing demand for individualized products increased drastically the complexity of both products and product creation processes. At the same time, the ever shortening product life cycles and increased competitive pressure force the companies and

*specially the development teams to respond faster and more innovative to market needs. The situation intensify with globally dispersed development and engineering teams who need to access to the same data and knowledge.*

*In order to cope with these challenges, design-related measures have to be incorporated in information-based methods. This needs the identification of existing interdependences between different disciplines along the entire product life cycle. It is particularly a special challenge for complex engineer to order products, which need to be engineered or even partly newly developed based on customer specific requirements and preferences.*

*The objective of this paper is the development and implementation of a concept for variant and complexity management in engineer to order manufacturing of Turbomachinery. This includes in particular the development of a companywide reference structure as the basic building block of the concept, an integrated variant management, change and configuration management and knowledge management to ensure a sustainable increasing of transparency in organization. The proposed concept is developed and implemented as a part of a joint project of the university Duisburg-Essen and the E P CP division of Siemens AG. It is however universally valid and can be used for other engineer to order manufacturing companies.*

**Stichwörter:** *Referenzstruktur, Variantenmanagement, Änderungsmanagement, Wissensmanagement, Kontinuierlicher Verbesserungsprozess, Transparenz*

**Keywords:** *Reference structure, Variant management, Change management, Knowledge management, Continuous improvement process, Transparency*

## **1 Einleitung**

Laut einer Studie von A.T. Kearney [1] ist die Komplexität sowohl ein wichtiger Kostentreiber (für 84%) als auch ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal (für 56%) der befragten Unternehmen. Trotz dieser enormen Bedeutung beurteilen die meisten Unternehmen ihre Kompetenzen im Komplexitätsmanagement als unzureichend. Wie in Abbildung 1 dargestellt ist, kann die Komplexität als das gleichzeitige Auftreten von Vielfalt und Veränderlichkeit verstanden werden. Je stärker die beiden Aspekte eines Systems ausgeprägt sind, desto komplexer ist das System [2]. Unter der Vielfalt wird dabei die Verschiedenartigkeit der in einem System befindlichen Elemente verstanden, während die Veränderlichkeit den Wandel der Elemente im Zeitablauf beschreibt und damit die Dynamik eines Systems darstellt [3]. Somit werden für ein ganzheitliches Komplexitätsmanagement beide Aspekte berücksichtigt, um entsprechend passende Lösungen anbieten zu können.



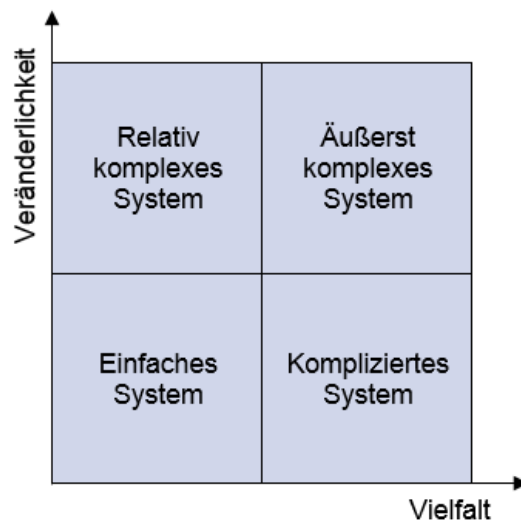


Abbildung 1: Einordnung komplexer Systeme [4]

Beim Komplexitätsmanagement steht vor allem die Gestaltung, Steuerung und Entwicklung der Vielfalt des Leistungsspektrums im Unternehmen im Vordergrund [5]. Es wird angestrebt, die Vielfalt in allen Wertschöpfungsstufen so zu beherrschen, dass ein maximaler Beitrag zum Kundennutzen, bei gleichzeitiger hoher Wirtschaftlichkeit des Leistungserstellers, erzielt werden kann. Dadurch kann die vom Produkt ausgehende Komplexität (z.B. Anzahl Teile, Komponenten, Varianten), wie auch die auf das Produkt einwirkende Komplexität (z.B. Marktdiversifikation, Produktionsabläufe), mittels geeigneter Instrumente bewältigt werden [5]. Zum Beherrschen der Veränderlichkeit des Systems werden dagegen die Beziehungen und Veränderungen der Systemelemente, des Leistungsspektrums und der Unternehmensprozesse berücksichtigt. Dafür sind sowohl die klare Definition von Geschäftsprozessen, Verhaltensregeln und Standarddokumenten [6] als auch die Erfassung und Dokumentation der Änderungen bis zu deren Umsetzung und Steuerung erforderlich.

## 2 Bausteine des Konzepts zum Komplexitätsmanagement

Ein abteilungs- und prozessübergreifendes Konzept ist eine wichtige Voraussetzung für ein effizientes und nachhaltiges Komplexitätsmanagement. Damit muss abgesichert werden, dass die Reduzierung bzw. Beherrschung der internen Komplexität die externe Vielfalt nicht negativ beeinflusst. Dies soll vor allem zur Erhöhung der Transparenz und Rückverfolgbarkeit innerhalb der Organisation, Verkürzung der Suchzeiten nach Informationen und Erleichterung der globalen Kommunikation und Koordination dienen [7]. Unter

Berücksichtigung der bestehenden Anforderungen und Einflussfaktoren wurde das Konzept mit vier Bausteinen entwickelt (siehe Abbildung 2). Dabei ist die Integration bzw. der Zusammenschluss der Bausteine „Referenzstruktur, Variantenmanagement, Änderungsmanagement und Wissensmanagement“ maßgebend für eine erfolgreiche und nachhaltige Transparenzerhöhung.

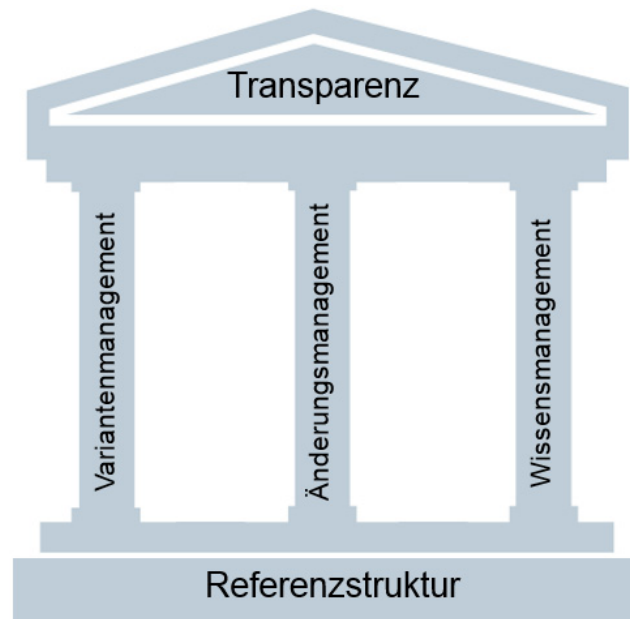


Abbildung 2: Bausteine des Komplexitätsmanagements

## 2.1 Referenzstruktur

Das Scheitern des ganzheitlichen Datenmanagementansatzes und die diversen operativen Strukturen entlang des Produktentstehungsprozesses zwingen zu einem Paradigmenwechsel, indem ein „Common Level“ die Integration und den Austausch der Informationen zwischen den unterschiedlichen Strukturen sicherstellt [8]. Dafür wird die Referenzstruktur als Basisbaustein des Ansatzes gesehen und dient als Backbone zur Verzahnung der Strukturen entlang des Prozesses von der Entwicklung über Vertrieb, Engineering, Fertigung bis zum Service [7], [8]. Sie ist modular aufgebaut und bietet ein globales Fundament zum Handling von Daten, Informationen und Wissen. Die Referenzstruktur wurde vor allem auf Basis der vorhandenen Strukturen entwickelt und vernetzt diese innerhalb der Organisation. Auf Grund der projekt- und kundenorientierten Charakteristik der Einzel- fertigung bildet der objektorientierte Projektstrukturplan den Kern der Referenzstruktur. Die weiteren Hauptcharakteristiken werden im Folgenden dargestellt:

- Die Referenzstruktur deckt das gesamte Portfolio ab und wird in global verteilten Unternehmensdivisionen verwendet.
- Die produkt- und projektspezifischen Strukturen werden von der Referenzstruktur abgeleitet.
- Die Referenzstruktur ist systemunabhängig und kommt in Haupt IT-Systemen (z.B. ERP, Konfigurator, Dokumentenmanagement) zum Einsatz.
- Je nach Anwendungsfall und erforderlichen Detaillierungsgrad kann die Referenzstruktur erweitert oder/ und vereinfacht werden.
- Die Referenzstruktur ist entlang des gesamten Lebenszyklus gültig und kommt als Basis des „single source of truth“ zum Einsatz.
- Die einzelnen Elemente der Referenzstruktur werden entlang des Lebenszyklus ergänzt bzw. angereichert.
- Jedes Element ist einzigartig und wird durch einen eindeutigen Code gekennzeichnet (numerisch oder alphanumerisch). Die Codes geben Auskunft über die Position und Ebene der Elemente.

Durch die Referenzstruktur wird vor allem das zeitaufwändige und fehleranfällige Mapping von Informationen und Dokumenten zwischen unterschiedlichen Strukturen vermieden und abteilungsübergreifende Kommunikation und Datenaustausch vereinfacht. Dazu kommt die Reduzierung der Suchzeit nach Informationen und Vereinfachung des Datentransfers entlang des Produktentstehungsprozesses.

## **2.2 Variantenmanagement**

Mit dem Variantenmanagement wird das Ziel verfolgt, eine optimale Variantenvielfalt herzustellen [9]. Damit besteht die zentrale Aufgabe des Variantenmanagements darin, die optimale Variantenvielfalt im Unternehmen zu bestimmen und Handlungsempfehlungen zu geben, wie diese optimale Vielfalt erreichbar ist. Das Variantenmanagement kann dabei in das strategische und das operative Variantenmanagement unterteilt werden [9]. Unter einer Variantenstrategie ist die Ausrichtung des Variantenspektrums zur optimalen Umsetzung der Produktprogrammstrategie zu verstehen. Dagegen sind beim operativen Variantenmanagement die Ziele des strategischen Variantenmanagements umzusetzen. Die Aufgabe des operativen Variantenmanagement besteht demnach darin, das Varianten-

spektrum zu analysieren und Maßnahmen zur Erreichung der optimalen Variantenvielfalt einzuleiten und durchzuführen.

Eines der strategischen Ziele des Variantenmanagements in der Einzelfertigung ist dabei die Beibehaltung der externen Vielfalt bei gleichzeitiger Reduzierung bzw. Beherrschung der internen Vielfalt. Dazu kommt eine abteilungsübergreifende Erhöhung der Transparenz auf Produkt- und Prozessebene innerhalb der Organisation. Um diese Ziele zu erreichen, sind in diesem Konzept folgende Maßnahmen auf der operativen Ebene vorzunehmen:

### **Festlegung des Produktportfolios**

Das Produktportfolio wird als erstes ganzheitlich mit Berücksichtigung aller wichtigen Anlagenelemente analysiert, um einerseits die Produktfamilien festzulegen und andererseits die mögliche Kombination der Hauptelemente abzubilden. Dabei ist zu beachten, dass die Konfigurationen auf Vorhandensein der Hauptkomponente einer Anlage beschränkt sein müssen.

### **Ableitung der Produktmodelle**

Die detaillierten Produktmodelle werden für einzelne Produktfamilien von der Referenzstruktur abgeleitet. Diese beinhalten nur die produktspezifischen Elemente und umfassen als Mastermodell alle produktrelevanten Daten, Informationen und Dokumente. Der Detaillierungsgrad der Produktmodelle kann abhängig von der Anwendung variieren.

### **Variantendefinition**

Die Variantendefinition ist eine der Kernaufgaben des Variantenmanagements, die einen wesentlichen Beitrag zur Transparenzerhöhung liefert. Hier werden die Merkmale einzelner Elemente der Produktmodelle festgelegt und deren Ausprägungen (falls vorhanden) definiert. Auf höherer Ebene wird die Anlage durch die Hauptmerkmale identifiziert und auf detaillierter Ebene werden die einzelnen Elemente durch Merkmale beschrieben. Außerdem werden in diesem Schritt die kostentreibenden Merkmale den Elementen zugeordnet. Zum Schluss müssen die Konfigurationsregeln und die Abhängigkeiten ermittelt werden, um die zulässigen bzw. machbaren Varianten zu definieren. Diese Informationen können sowohl in Konfigurator-Systemen als auch zur Visualisierung der Variantenbäume verwendet werden.

## Variantenkostenanalyse

Die Variantenkostenanalyse wird auf Basis von bereits zugeordneten kostentreibenden Merkmalen und unter Berücksichtigung der Kostenarten durchgeführt und kann auf Komponenten-, Produkt-, oder Anlagenebene ausgeübt werden. Damit werden die Optimierungspotenziale schneller erkannt und die Produktkosten können gezielter durch geeignete Maßnahmen optimiert werden.

## 2.3 Änderungsmanagement

Ein ganzheitliches Änderungsmanagement unterstützt die Organisation, um die komplexen Prozesse und deren Wechselbeziehungen effektiver und effizienter zu verwalten. Dadurch werden zum einen die zeitlichen Änderungen eines Produkts und zum anderen die auftragsbezogenen Änderungen dokumentiert. Auf Grund der Besonderheiten der Einzelfertigung, werden nur die Produktmodelle auf Hauptelementebene versioniert und deren Entwicklungsstände dokumentiert. Im Falle auftragsbezogener Änderungen werden diese dann separat dokumentiert, damit die Rückverfolgbarkeit der Änderungen sichergestellt wird. Die Produktmodellelemente werden durch eine dreistellige Versionsnummer versioniert (siehe Abbildung 3). Die Versionsnummer ist dann abhängig von auftragsneutralen Informationen und Dokumenten (z.B. Konstruktionsstandards, Berechnungsvorschriften und -tools) einzelner Elemente festzulegen und zu ändern. So kann z.B. nachvollzogen werden, welche Version von Produktmodellen, Dokumenten oder Softwarewerkzeugen im Rahmen der Auftragsabwicklung genutzt wurde.

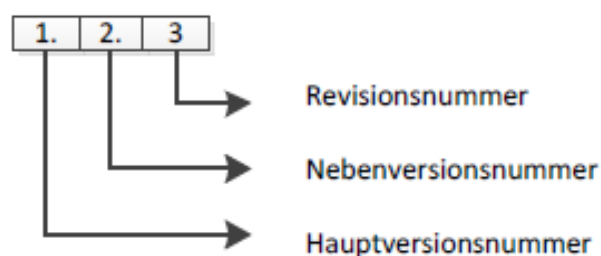


Abbildung 3: Dreistellige Versionsnummer

Das Änderungsmanagement fokussiert vor allem auf die Beherrschung des Veränderlichkeitsaspekts der Komplexität, die einen kritischen Einfluss auf Reduzierung bzw. Beherrschung der internen Komplexität hat. Dadurch wird es ermöglicht:

- Die Weiterentwicklung der Produktmodelle zu überwachen und deren Rückverfolgbarkeit zu sichern.
- Die Verbindungen und Wechselwirkungen zwischen Produktmodellen und auftragsneutrale Informationen zu identifizieren.
- Sich schneller einen Überblick über durchgeführte Änderungen und Technologiesprünge zu verschaffen.
- Die Änderungsprozesse effektiver zu verwalten und die Zuständigkeiten zu definieren.

## **2.4 Wissensmanagement**

Nach Probst et. al. [10] ist Wissen „die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Individuen zur Lösung von Problemen einsetzen. Wissen stützt sich auf Daten und Informationen, ist im Gegensatz zu diesen jedoch immer an Personen gebunden“. Die Ressource „Wissen“ ist ein signifikanter Erfolgsfaktor für Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens und Wissensmanagement wird in das strategische und das operative Wissensmanagement unterteilt [11]. Eins der strategischen Ziele des Wissensmanagements in der Einzelfertigung ist dabei die Verwirklichung von „Single source of truth“ für alle produktrelevanten Daten, Informationen und Wissen im Unternehmen. Hinzugefügt werden müssen die Vereinfachung und abteilungsübergreifende Vereinheitlichung der Verwaltung-, Pflege- und Zugriffprozesse, um die Suchzeiten zu reduzieren und allen zu ermöglichen, schneller auf die richtigen Informationen zuzugreifen.

Die Produktmodelle sind der Basisbaustein für Wissensmanagement auf operativer Ebene. Sie dienen als zentrale Quelle der produktrelevanten Daten und Informationen und ermöglichen eine nachhaltige und durchgängige Generierung von Wissen aus Informationen. Die auftragsneutralen Informationen werden als Konstruktionsstandards, Werknormen etc. einzelner Elemente der Produktmodelle zugeordnet und immer wieder durch neu erworbenes Wissen angereichert. Das Unternehmenswissen wird zum Beispiel durch interne und externe Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten oder auch Rückmeldungen des Fieldservices und der Kunden erweitert.

Durch standardisierte Produktmodelle und einheitliche Verwaltung des Wissens im Unternehmen können Mitarbeiter viel schneller auf gewünschte Informationen zugreifen und diese für eine effektive und effiziente Bearbeitung ihrer Aufgaben nutzen. Dadurch

wird einerseits die Wiederverwendung der bestehenden Daten, der Informationen und des Wissens erhöht und andererseits die Wiedergenerierung des Wissens beschleunigt, dass wiederum einen nachhaltigen Wettbewerbsvorteil für das Unternehmen verschafft.

### 3 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein Konzept zum Varianten- und Komplexitätsmanagement in der Einzelfertigung vorgestellt, dass die beiden Aspekte der Komplexität (Vielfalt und Veränderlichkeit) berücksichtigt. Das Hauptziel besteht darin die interne Komplexität zu reduzieren und zu beherrschen und gleichzeitig die externe Komplexität bzw. Vielfalt beizubehalten. Die dadurch erzielte Transparenz ist nachhaltig ein wesentlicher Erfolgsfaktor, der die Wettbewerbsfähigkeit und die Flexibilität des Unternehmens im Vergleich zur Konkurrenz steigert.

Komplexitätsmanagement muss daher als eine Managementdisziplin gesehen werden, die ständig die Unternehmensleistungen und -prozesse überwacht und abteilungsübergreifende Handlungsempfehlungen abgibt. Dafür dienen die vier Bausteine des Konzepts nicht nur zur Erstimplementierung sondern auch als Leitfaden für weitere Pflege-, Verbesserungs- und Erweiterungsaktivitäten. Die Referenzstruktur bietet als Basisbaustein ein solides Fundament für das integrierte Varianten-, Änderungs- und Wissensmanagement. Diese Bausteine sind fest ineinander verzahnt, um Insellösungen zu vermeiden und die Synergien auszunutzen.

### Literatur

- [1] A.T. Kearny (2009): Study on: Complexity Management – Chances amid the crisis. A.T. Kearney 82/06.2009/20260.
- [2] Grossmann, Christoph (1992): Komplexitätsbewältigung im Management: Anleitungen, integrierte Methodik und Anwendungsbeispiel. Dissertation, Universität St. Gallen, St. Gallen.
- [3] Reiß, Michael (1993): Komplexitätsmanagement. In: WISU - Das Wirtschaftsstudium (1/93), S. 54–59.
- [4] Alders, K. (2006): Komplexitäts- und Variantenmanagement der AUDI AG. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- [5] Schuh, Günther (2005): Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools. 2. Auflage. München: Hanser.
- [6] Greitemeyer, Jörg; Ulrich, Thomas (2006): Umfassendes Komplexitätsmanagement – die optimale Komplexitätsbalance finden und kostengünstig halten. UNITY AG

- [7] Hooshmand, Yousef; Köhler, Peter; Korff-Krumm, Andrea (2013): Komplexitätsbeherrschung und Transparenzerhöhung in der Einzelfertigung. ProduktDaten Journal; Nr. 2, S. 55-59.
- [8] Stekolschik, Alexander; Schulte, Stefan (2014): Approach for an integrated reference structure in the product lifecycle. Proceedings of TMCE 2014. Budapest, Hungary. ISBN 978-94-6186-177-1
- [9] Heina, Jürgen (1999): Variantenmanagement. Kosten-Nutzen-Bewertung zur Optimierung der Variantenvielfalt. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.
- [10] Probst, Gilbert; Raub, Steffen; Romhardt, Kai (2006): Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. 5. Auflage. Wiesbaden: Gabler.
- [11] North, Klaus (2012): Wissensorientierte Unternehmensführung: Wertschöpfung durch Wissen. 5. Auflage. Wiesbaden: Gabler.



# Analyse und Vergleich neuer 3D CAD Datenformate als Basis für Soll-Ist-Vergleiche auf mobilen Endgeräten

Enrico Kloss, Klaus Brökel

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD, Universität Rostock

Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock

E-Mail: [enrico.kloss@uni-rostock.de](mailto:enrico.kloss@uni-rostock.de); Internet: <http://www.kt.uni-rostock.de>

**Inhalt:** In diesem Beitrag werden die drei neutralen CAD-Datenformate JT, STL und AMF mit ihren Strukturen vorgestellt und es wird ein Konverter präsentiert, der es ermöglicht die benötigten Konstruktionsdateien für einen Soll-Ist-Vergleich auf mobilen Endgeräten in das je nach Einsatzfall benötigte Format zu transformieren und die Geometrie für den weiteren Arbeitsablauf bereitzustellen.

**Abstract:** This research article presents the structures of the neutral CAD file formats JT, STL and AMF. Furthermore a converter is presented, that generates design data sets in any of these formats for the use in target-actual-comparisons according to the application.

**Stichwörter:** neutrales CAD-Datenformat, Soll-Ist-Vergleich, mobile Anwendung

**Keywords:** neutral CAD data format, target actual comparison, mobile application

## 1 Einleitung und Motivation

Der Soll-Ist-Vergleich ist eine wichtige Methodik zur Qualitätsprüfung von gefertigten Bauteilen. Das gefertigte Ist-Modell wird mit dem geplanten Soll-Modell verglichen und Differenzen ausgewertet. Das Soll-Modell wird i.d.R. mit einer CAD-Software modelliert, wohingegen das Ist-Modell mit 3D Aufnahmetechniken, wie Laserscanning, vom Bauteil generiert werden muss. Für eine lückenlose Produktdokumentation ist es notwendig die Ergebnisse des Vergleichs der beiden Modelle zu speichern und für Kunden oder Unterauftragnehmer bereit zu halten. In vielen Fällen erfolgt diese Archivierung schon jetzt in PDM-Systemen, in denen auch die Soll-Daten als CAD-Bauteile verwaltet werden. Der Soll-Ist-Vergleich erfolgt, insbesondere bei großen, maritimen Produkten, durch ein manuelles Aufmaß und muss durch eine Vielzahl von Ortsbegehungen verifiziert werden. [1] Zur Verringerung dieses Aufwands ist es wünschenswert diese Arbeitsschritte zukünftig dadurch zu minimieren, dass man es ermöglicht den Soll-Ist-Vergleich mit einem mobilen Endgerät durchzuführen. Es ist dabei einerseits notwendig die Soll-Daten direkt aus einem

vorhandenen PDM-System zu exportieren und andererseits die Ist-Geometrie durch 3D Aufnahmetechniken in das mobile Endgerät zu laden. Unter Verwendung von Elementen der erweiterten Realität (AR - Augmented Reality) lassen sich diese beiden Datenstämme aufeinander registrieren und in einer mit dem Kamerabild des Endgerätes abgestimmten Umgebung visualisieren. Anschließend ist der Soll-Ist-Vergleich, in Abhängigkeit von der Inspektionsaufgabe, durchführbar.

Aus Dateisicht ist es notwendig die zu vergleichenden Daten in ein Format zu bringen, welches es ermöglicht Soll- und Ist-Geometrie aufeinander zu registrieren. Dabei liefern alle 3D Aufnahmetechniken mindestens das Dateiformat STL (Surface Tesselation Language) zur Beschreibung der Oberfläche mit Hilfe von Dreiecken. Auf der Soll-Seite gibt es in den CAD-Systemen eine Vielzahl von geeigneten Beschreibungen für die Geometrie. Für eine Verarbeitung auf mobilen Endgeräten bieten sich dabei schlanke Datenformate an, welche möglichst geringen Speicherbedarf benötigen, eine genaue Beschreibung der Oberfläche zulassen und dennoch die Möglichkeit bieten Zusatzinformationen der CAD-Features, wie Bohrungen oder Schweißnähte, zu speichern. Dabei fiel die Wahl auf das JT-Format (Jupiter Tesselation), das es mit seiner Containerstruktur ermöglicht frei definierbare Metainformationen in den CAD-Daten zu speichern und dabei kompakter ist als alle proprietären CAD-Formate. Als Alternative stellt sich ebenfalls das noch sehr junge STL Nachfolgeformat AMF (Additive Manufacturing File Format) dar.

## **2 Neutrale CAD-Datenaustauschformate und ihre Strukturen**

Aus dem großen Angebot an neutralen CAD-Datenaustauschformaten erfolgte die Auswahl dieser drei Formate, da in jedem dieser Datentypen die Beschreibung der Geometrie als Flächennetz möglich ist. Betrachtet man im Soll-Ist-Vergleich die Seite der Ist-Geometrie, so ist man bei der industriellen Generierung dieser Datensätze, wie bereits erwähnt, auf Reverse Engineering Werkzeuge, wie Laserscanner oder andere 3D Rekonstruktionstechniken, angewiesen. Die 3D Datensätze werden aus diesen Technologien in verschiedenen Formaten exportiert. Ein Format, welches alle Messtechniken unterstützen ist das STL-Format.

## 2.1 Das STL-Format

Das STL-Dateiformat wurde 1989 als Austauschformat für Geometriedaten entwickelt. Hier wird die reine Geometrie ohne weitere Informationen abgebildet. Es werden keine Volumina oder Metadaten gespeichert und die Modelle werden als reine Oberflächenmodelle hinterlegt. Für die Darstellung wird jede Fläche in Dreiecke zerlegt (tesselliert). Die Beschreibung der Dreiecke erfolgt durch die Koordinaten der drei Eckpunkte und die Richtung der Flächennormalen. Die Genauigkeit der Darstellung eines Modells hängt von der Anzahl der erzeugten Dreiecke ab. Ist die Anzahl gering, ist der Darstellungsfehler entsprechend groß. Eine gekrümmte Fläche wird durch die Dreiecke angenähert. Das STL-Format stellt aufgrund der Polygondarstellung nur eine Approximation der Originalgeometrie dar. [2] Eine STL-Datei kann sowohl im ASCII- als auch im Binär-Format gespeichert werden. Für einfache Modelle ist es unproblematisch die Datei im ASCII-Format zu speichern. Bei komplexen oder großen Bauteilen werden die STL-Dateien sehr groß, wenn die Speicherung nicht im binären Format erfolgt. Die Decodierung des Binärformats ist einfach und folgt der Byte-Reihenfolge Little-Endian.

## 2.2 Das AMF-Format

Für das STL-Format wird versucht ein Nachfolgeformat zu etablieren. Dieses Format trägt den Namen AMF und steht für „Additive Manufacturing File Format“. Es handelt sich dabei um einen Open Source Standard zum Beschreiben von Objekten für die additive Herstellung von Modellen, wie z. B. beim 3D-Drucken. Eingeführt wurde dieses Format am 2. Mai 2011. Es wurde von ASTM International entwickelt und ist unter dem Standard ISO / ASTM52915 beschrieben. [3] Das Besondere hierbei ist, dass dieses Format einen XML-Aufbau (Extensible Markup Language) vorweist. Es unterstützt außerdem auch Farben, Materialien, Texturen und Anordnungen. Die Speicherung einer AMF-Datei ist wie auch beim STL im ASCII-Format oder in einem kodierten Format möglich. Mit dem AMF-Format besteht die Möglichkeit ein oder mehrere Objekte in einer bestimmten Anordnung darzustellen. Jedes dieser Objekte wird durch nicht überschneidende Volumina beschrieben. Die einzelnen Volumina werden durch ein Dreiecksnetz dargestellt, welches eine Gruppe von Punkten referenziert. Diese Punkte können von verschiedenen Volumina verwendet werden. In einer AMF-Datei kann jedem Volumen und jeder Dreiecksfacette ein Material und eine Farbe zugewiesen werden. Damit die Geometrie möglichst genau dargestellt

wird, unterstützt das AMF-Format gebogene Dreiecksfacetten (siehe Abbildung 1). Gebogene Dreiecke können optional spezifiziert werden, um die Anzahl der Elemente im Netz zu reduzieren. Hierdurch kann die Zahl der Elemente, die benötigt wird, um eine gebogene Fläche zu beschreiben, verringert werden. Ebenfalls kann auf diese Weise der Fehler, der durch die Beschreibung einer gekrümmten Fläche mittels ebener Dreiecke entsteht, um den Faktor 1000 reduziert werden. Die Krümmung sollte keine Abweichung von mehr als 50% zur größten Abmessung der Dreiecke, bezogen auf die Ebene der flachen Dreiecke, betragen. [4]

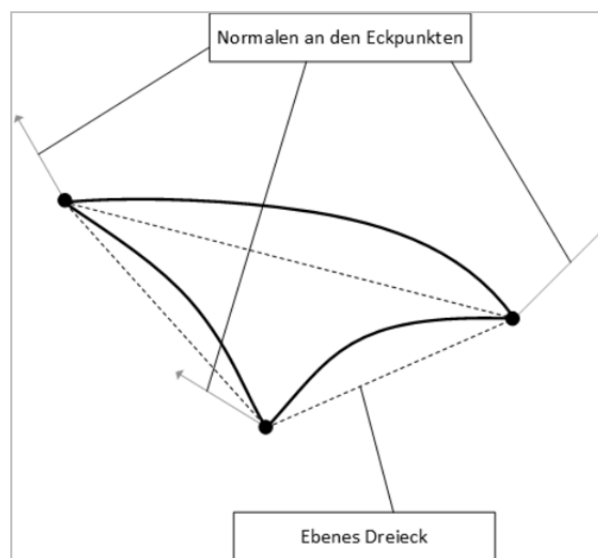


Abbildung 1: Beispiel für eine gebogene Dreiecksfacette im AMF-Format

## 2.3 Das JT-Format

Das 1998 entwickelte JT-Format dient zum besseren Datenaustausch, zur Langzeitarchivierung und auch zur Visualisierung. Neben den Geometriedaten können auch PMI (Product Manufacturing Information) in der Datei gespeichert werden. Es ist fester Bestandteil des von Siemens verwendeten PDM-Systems Teamcenter. Neben der tessellierten Geometriedarstellung kann auch die Darstellung über die Boundary-Representation erfolgen. Es werden sowohl JT-BRep als auch das XT-BRep unterstützt. Im Jahr 2003 wurde die JT-Open-Initiative gegründet. In dieser sind neben Siemens und einigen Automobilherstellern auch Universitäten vertreten. Ist eine Firma oder Institution Mitglied bei JT-Open, so erhält diese Zugriff auf das JT-Open-Toolkit für C++. Hiermit können Anwendungen zum Erstellen, Einlesen oder Bearbeiten von JT-Dateien erstellt werden. Im Jahr 2007 wurde die erste Version der Spezifikation zum Dateiformat veröffentlicht. In dieser ist

die Struktur des Formates beschrieben und es sind auch Beispiele für die Dekodierung einer JT-Datei vorhanden. Das JT-Format ist ein Containerformat mit frei definierbaren Komponenten. Bei der Entwicklung des Formates, die noch nicht abgeschlossen ist, wird versucht, speziell auf Wünsche der Firmen einzugehen. Es gibt Arbeitsgruppen, in denen verschiedene Anwender zusammenfinden und Anwendungsfälle diskutieren. So soll das Format an die entsprechenden Industriebereiche angepasst werden. Im Dezember 2012 wurde JT in der ersten Version (JT ISO V1) als internationaler Industriestandard (ISO 14306:2012) veröffentlicht. Im Jahr 2013 ist damit begonnen worden, die zweite Version des Standards zu entwickeln. [5] Für die Gestaltung einer möglichst kompakten Dateigröße, wird jede JT-Datei komprimiert. Wird sie in Klartext übersetzt und beim Speichern nicht wieder kodiert, so kann sie später nicht wieder geöffnet werden. Es werden vier verschiedene Kodierungsalgorithmen verwendet. Diese sind die arithmetische, die Bitlängen-, die Huffman und die Deering Normal Verschlüsselung. [6], [7]

## 2.4 Vergleich der Strukturen von STL, AMF und JT

Für ein besseres Verständnis der Inhalte von Dateien in den drei neutralen CAD-Austauschformaten STL, AMF und JT ist es notwendig, sich ein Bild von den Inhalten und Strukturen dieser Dateien zu machen. Zur Analyse des Aufbaus wurden Vertreter der Datentypen jeweils in Klartext (ASCII) übersetzt. Als Referenzdaten wurden zwei unterschiedliche Modelle gewählt: zum einen ein Würfel mit 50 Millimetern Kantenlänge und zum anderen einen geraden Kreiszylinder mit einem Durchmesser und einer Höhe von 50 Millimetern. Die kartesischen Koordinatensysteme wurden im Fall des Würfels auf einem der Eckpunkte platziert und im Fall des Zylinders in der Mitte des Grundkreises. Diese Referenzmodelle wurden in allen drei Formaten erstellt und miteinander verglichen. Exemplarisch werden hier Ausschnitte der Inhalte gezeigt und erläutert.

In Abbildung 2 ist der Ausschnitt einer STL-Datei im ASCII-Format zu erkennen. Der Dateiausschnitt bestimmt einen Würfel mit der Kantenlänge von 50 Millimetern. Hinter „solid“ steht meist der Dateiname. Die Bezeichner „solid“ und „endsolid“ grenzen die beinhalteten Daten ab. Zwischen den Befehlen „facet“ und „endfacet“ wird ein Dreieck definiert. Nach dem Bezeichner „facet normal“ folgt der Normalenvektor der Dreiecksfläche. Mit dieser Angabe werden die Innen- und die Außenseite des Dreiecks definiert. Im Block von „outer loop“ bis „endloop“ werden die kartesischen Koordinaten der drei Eckpunkte des

Dreiecks im Bezug auf das Standardkoordinatensystem beschrieben. Ein Würfel mit seinen sechs Seiten wird in 12 Dreiecksfacetten zerlegt. Daraus ist erkennbar, dass es zu einer Redundanz in der Beschreibung der einzelnen Punkte kommt. Jeder Eckpunkt im Würfel kann in bis zu sechs Facetten Verwendung finden. Dadurch wird dieser Punkt in sechs „loops“ vorhanden sein.

```
solid ascii
facet normal -1.000000e+000 7.105427e-017 0.000000e+000
outer loop
vertex -2.500000e+001 0.000000e+000 -2.917808e+001
vertex -2.500000e+001 0.000000e+000 2.082192e+001
vertex -2.500000e+001 5.000000e+001 -2.917808e+001
endloop
endfacet
.
.
.
endsolid
```

Abbildung 2: Auszug einer STL-Datei im ASCII-Format

Der Aufbau einer AMF-Datei ist in Abbildung 3 dargestellt. In der Struktur gibt es fünf übergeordnete Elemente. Diese fünf Elemente sind:

- 1) <object>: Dieses Element definiert ein Volumen für das Drucken, mit einer zugehörigen Material ID. Es muss vorhanden sein, damit die Datei nicht fehlerhaft ist.
- 2) <material> Dieses optionale Materialelement definiert ein oder mehrere Materialien für das Drucken mit einer zugehörigen Material-ID. Fehlt dieses Element, wird ein Standardmaterial angenommen.
- 3) <texture> Dieses optionale Element definiert ein oder mehrere Bilder oder Texturen für jede Farbe oder jedes Textur-Mapping, wobei es immer eine Texture ID gibt.
- 4) <constellation> Dieses optionale Element kombiniert Objekte und andere Anordnungen hierarchisch in einem relativen Muster für den 3D-Druck.
- 5) <metadata> Dieses optionale Element spezifiziert zusätzliche Informationen über die Objekte und Elemente, welche die Datei enthält.

Die AMF-Datei beginnt mit einem Element, welches die XML-Version und die Zeichencodierung angibt. Danach wird die in der Datei verwendete Maßeinheit angegeben. Anschließend folgt das Element <object>. Dieses enthält eine einzigartige ID oder kann auch optional ein Material definieren. Die Netzgeometrie enthält ein einzelnes <mesh> Element. In diesem Element werden die zwei Unterelemente <verticies> und <volume> definiert. Das erste Unterelement enthält alle Eckpunkte des Objektes. Jeder Punkt wird über das TAG-Paar <vertex>, </vertex> definiert.

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<!--AMF generated by Jonathan Hiller's XmlStream class, originally written
for AMF file format (http://amf.wikispaces.com/)-->
<amf unit="millimeter" version="1.1">
  <metadata type="name">wuерfel_inventor_amf</metadata>
  <object id="3">
    <metadata type="name">wuерfel_inventor_ascii</metadata>
    <mesh>
      <vertices>
        <vertex>
          <coordinates>
            <x>-50</x>
            <y>0</y>
            <z>-50</z>
          </coordinates>
        </vertex>
      </vertices>
    </mesh>
    <volume materialid="3">
      <metadata type="name">wuерfel_inventor_ascii</metadata>
      <triangle>
        <v1>5</v1>
        <v2>1</v2>
        <v3>7</v3>
      </triangle>
    </volume>
  </object>
</amf>

```

Abbildung 3: Auszug einer AMF-Datei im ASCII-Format

Innerhalb dieses Paares werden die drei Koordinaten angegeben. Die drei Raumkoordinaten sind als einzelne Elemente vorhanden. Außerdem sind diese im Element `<coordinates>` eingebunden. So werden alle Punkte mit dem `<vertex>` Element beschrieben. Nach dem `<vertex>` Element muss mindestens ein `<volume>` Element vorhanden sein. Ein `<volume>` Element beinhaltet das geschlossene Volumen eines Objektes. Es ist möglich, mehrere solcher Elemente in einem Objekt zu definieren. Mehrere Volumina können sich die Eckpunkte teilen, jedoch dürfen sich die Volumina nicht überschneiden. Das Element `<triangle>` ist ein Kindelement des `<volume>` Elements. In diesem werden die Dreiecke des tessellierten Netzes definiert. Jedes dieser Elemente enthält drei Elemente aus den vorherigen Eckpunkten. Mit den Elementen `<v1>`, `<v2>` und `<v3>` werden die indizierten Eckpunkte der Dreiecke definiert. Die Reihenfolge der Eckpunkte muss der „Rechten-Hand-Regel“ entsprechen, sodass von außen betrachtet die Eckpunkte gegen den Uhrzeigersinn verlaufen. Die Reihenfolge, in der die Eckpunkte und Dreiecke definiert werden, entspricht ihrer Nummerierung und beginnt mit der Nummer Null.

Ein Beispiel für die Struktur zur Beschreibung der Geometrie in einer JT-Datei ist in Abbildung 4 zu finden.

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<JTFile>
<JtkPart>
  <JtkPartName>quader</JtkPartName>
  ver = 0, id = 0, units = cm
  <LOD>
    0
  <Shape>
    0
    JtkTriStripSet
    <geomSet>
      0
      <NormalenPunkte> 1, 2.03012e-016, -0, -38.6503, 77.1166, 10, -38.6503, 112.117, 10, -38.6503, 77.1166, 210 </NormalenPunkte>
      <NormalenPunkte> 1, 2.03012e-016, -0, -38.6503, 112.117, 10, -38.6503, 77.1166, 210, -38.6503, 112.117, 210 </NormalenPunkte>
    </geomSet>
    <geomSet>
      1
      <NormalenPunkte> 1.42109e-016, -1, 0, -138.65, 77.1166, 10, -38.6503, 77.1166, 10, -138.65, 77.1166, 210 </NormalenPunkte>
      <NormalenPunkte> 1.42109e-016, -1, 0, -38.6503, 77.1166, 10, -138.65, 77.1166, 210, -38.6503, 77.1166, 210 </NormalenPunkte>
    </geomSet>
    <geomSet>
      2
      <NormalenPunkte> -1, 8.12049e-016, 0, -138.65, 112.117, 210, -138.65, 112.117, 10, -138.65, 77.1166, 210 </NormalenPunkte>
      <NormalenPunkte> -1, 8.12049e-016, 0, -138.65, 112.117, 10, -138.65, 77.1166, 210, -138.65, 77.1166, 10 </NormalenPunkte>
    </geomSet>
    <geomSet>
      3
      <NormalenPunkte> 0, 1, 0, -38.6503, 112.117, 10, -138.65, 112.117, 10, -38.6503, 112.117, 210 </NormalenPunkte>
      <NormalenPunkte> 0, 1, 0, -138.65, 112.117, 10, -38.6503, 112.117, 210, -138.65, 112.117, 210 </NormalenPunkte>
    </geomSet>
    <geomSet>
      4
      <NormalenPunkte> -0, -0, -1, -138.65, 77.1166, 10, -138.65, 112.117, 10, -38.6503, 77.1166, 10 </NormalenPunkte>
      <NormalenPunkte> -0, -0, -1, -138.65, 112.117, 10, -38.6503, 77.1166, 10, -38.6503, 112.117, 10 </NormalenPunkte>
    </geomSet>
    <geomSet>
      5
      <NormalenPunkte> 0, 0, 1, -38.6503, 112.117, 210, -138.65, 112.117, 210, -38.6503, 77.1166, 210 </NormalenPunkte>
      <NormalenPunkte> 0, 0, 1, -138.65, 112.117, 210, -38.6503, 77.1166, 210, -138.65, 77.1166, 210 </NormalenPunkte>
    </geomSet>
  </Shape>
</LOD>
<LOD>
  1
  <Shape>
    0
  </Shape>
  ...

```

Abbildung 4: Auszug einer JT-Datei im ASCII-Format

Im Gegensatz zu den Beispielen der STL- und AMF-Dateien handelt es sich hier nicht um einen Würfel sondern einen Quader mit variabler Höhe, Breite und Tiefe. Die Datei wurde mit der Funktionalität JtkTraverse des JT Toolkits decodiert. Im Rahmen des Forschungsprojekts Dyn3D\_Pro wurden ebenfalls Decodierungen mit dem JTInspector durchgeführt. Dieses Programm ist Teil des Lieferumfangs der Teamcenter Lifecycle Visualization Lizenz aus dem Hause Siemens. Während man mit dem JTInspector Zugriff auf die Metainformationen, wie Volumen, Dichte, gespeicherte Ansichten und PMI bekommt, fehlt die geometrische Beschreibung der Modelle komplett und wird durch Platzhalter er-



setzt. Deshalb ist ein Ausweichen auf den Funktionsumfang des JT Toolkits unumgänglich.

In der decodierten JT-Datei erkennt man die XML Struktur, in der die geometrischen Informationen gespeichert werden. Standardmäßig werden drei LOD (Level of Detail) gespeichert. Für ein so einfaches Bauteil wie einen Quader findet man in allen drei <LOD> Elementen die gleichen Geometrieinformationen. Eine JT-Datei strukturiert die Geometrie in verschiedenen <Shape> Entitäten, welche aus beliebig vielen Elementen namens <geomSet> bestehen. Im Beispiel genügen für die Beschreibung der Quaderseiten je zwei Dreiecksflächen, welche auch im JT über die Flächennormale und die drei Eckpunkte in kartesischen Koordinaten beschrieben werden. Die Werte befinden sich im Element <NormalenPunkte>.

### 3 Entwicklung eines Konverters

Nach der eingehenden Analyse der Strukturen erfolgte die Programmierung eines Dateikonverters, der es ermöglicht Dateien der Formate AMF und JT in das Dateiformat STL zu konvertieren und diesen Prozess auch umzukehren. Die Entscheidung fiel auf das Format STL, da es als Ausgangsbasis für die zu verwendenden Algorithmen dient. Sowohl die 3D Registrierung der Punktwolken als auch das modellbasierte Tracking nutzen den C++ Funktionsumfang des open source Projekts PCL (Point Cloud Library). Die CAD Soll-Daten werden in den Formaten JT oder AMF geliefert und müssen für die Arbeit mit der PCL in das STL-Format konvertiert werden. Die originalen Referenzdaten werden für Visualisierungszwecke und den Export auf das zu verwendende mobile Endgerät auch nach der Registrierung benötigt. Das bedeutet die Scandaten (Ist) im STL-Format werden auf die konvertierten Soll-Daten registriert und anschließend wieder in dem ursprünglichen Austauschformat gespeichert.

Für die Konvertierung wurden die Informationen der Dateien auf die Beschreibung der Geometrie durch Dreiecksflächen reduziert. In allen drei betrachteten Formaten findet man die kartesischen Koordinaten der Eckpunkte und den Vektor der zur Fläche gehörenden Normalen. Die Konvertierung der Daten erfolgt mit Hilfe von günstig gewählten Hashfunktionen, um den Zeitaufwand bei der Umwandlung zu reduzieren. Für die Entwicklung des Konverters wurde eine GUI mit Textausgabe erstellt, um die Ergebnisse validieren zu können. Die Implementierung in den Prototypen erfolgte anschließend ohne diese Benutzer-

oberfläche. Der Prototyp des entwickelten AR Systems ist eine Entwicklungsversion des CAD Moduls der Software DCAM, welches vom Unternehmen S.K.M. Informatik GmbH entwickelt wurde. Sowohl der Konverter als auch die Algorithmen der 3D Registrierung auf Basis der PCL Funktionen sind in dieser Software prototypisch einsetzbar.

#### 4 Einbindung des entwickelten Moduls im Gesamtarbeitsprozess

Der Einsatz der entwickelten Konvertierungsalgorithmen erfolgt in der Schnittstelle des prototypischen AR-Systems zwischen der Gewinnung der CAD-Solldaten (Objektmodell) und der Ist-Daten aus dem Reverse Engineering Prozess (Laserscandaten). Wie in Abbildung 5 zu erkennen ist, werden auf Basis dieser Daten Punktwolken extrahiert und zur Herstellung einer Gleichverteilung aufbereitet.

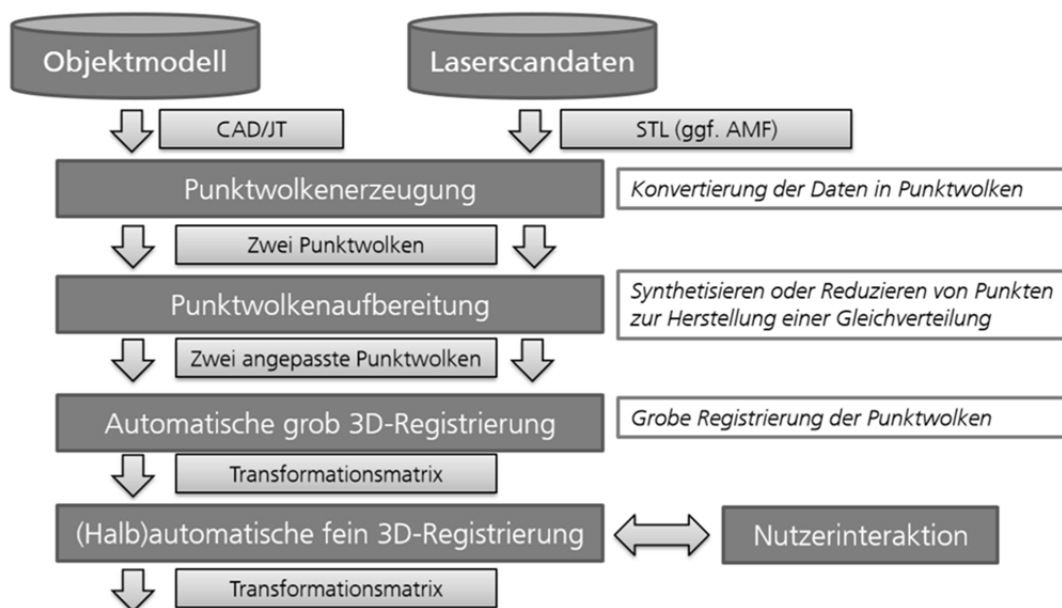


Abbildung 5: Gesamtprozess des Soll-Ist-Vergleichs im Projekt Dyn3D\_Pro

Die anschließenden Aufgaben der Registrierung werden von anderen Forschungspartnern des Projektkonsortiums erarbeitet. An die Registrierung schließen sich MarkUp Funktionalitäten an, welche durch die DCAM-Umgebung realisiert werden. Mit Ihnen ist eine halbautomatische Auswertung des Soll-Ist-Vergleichs bereits möglich.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Für das Ziel eines Soll-Ist-Vergleichs von maritimen Großstrukturen auf einem mobilen Endgerät ist es notwendig, sich auf CAD-Formate zu einigen, welche diversen Kriterien entsprechen müssen. Die hohen Hardwareanforderungen der heutigen CAD-Software stellen diesbezüglich eine neue Herausforderung für die Arbeit auf den zumeist leistungsschwächeren mobilen Plattformen dar. Mit dem vorliegenden Überblick über die interessanten CAD-Datenaustauschformate STL, AMF und JT wird die Wahl der zu verwendenden Dateiformate unterstützt. Der Konverter in seiner bisherigen Form ermöglicht die Umwandlung der beschriebenen Dateiformate in das jeweils gewählte Zielformat. Für die weitere Koordination der Aktivitäten im Forschungsprojekt Dyn3D\_Pro wird der Dateikonverter weiter entwickelt. Die Repräsentation der Modellgeometrie wird dann an die zu bearbeitenden Aufgaben angepasst und in Zukunft um die Speicherung der benötigten Metainformationen erweitert werden.

## Literatur

- [1] Zwischenbericht zum ZIM geförderten Forschungsprojekt Dyn3D\_Pro (2013). Augmented Reality System zur dynamischen 3D-Änderungskonstruktion
- [2] Danjou S., Koehler H. (2008). Vorbereitung von CAD-Konstruktionsdaten für den RP-Einsatz – eine Schnittstellenproblematik. RTejournal - Forum für Rapid Technologie, Vol. 5(2008)
- [3] Standard ISO / ASTM52915 (2014). Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.1. Book of Standards Volume: 10.04
- [4] Pakulat M. (2013). Vergleich neutraler 3D CAD Datenaustauschformate als Beitrag zur Entwicklung eines neuen Dateikonverters. Studienarbeit Universität Rostock
- [5] Homepage Siemens JT Open (Stand: August 2014) - Newsroom.  
[http://www.plm.automation.siemens.com/de\\_de/about\\_us/newsroom/press/press\\_release.cfm?Component=205727&ComponentTemplate=822](http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/about_us/newsroom/press/press_release.cfm?Component=205727&ComponentTemplate=822)
- [6] Ball A., Ding L., Patel M. (2007). Lightweight Formats for Product Model Data Exchange and Preservation. PV 2007 Conference, 2007-10-09 - 2007-10-11, Oberpfaffenhofen/München
- [7] ISO 14306:2012-12 (2012). Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - JT-Dateiformat für 3D-Visualisierung



## Methode zur Beherrschung von Unsicherheit in expliziten 3D-CAD Geometrien

Maximilian Zocholl, Thomas Trinkel, Reiner Anderl

Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK), Technische Universität Darmstadt

Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

E-Mail: zocholl@dik.tu-darmstadt.de; Internet: www.dik.tu-darmstadt.de

**Inhalt:** Explizite 3D-CAD Geometrien werden von der a priori Unsicherheit über deren Datenqualität überlagert. Dies führt zu einer Abweichung gegenüber der Modellierungsabsicht und beeinflusst alle darauf folgenden Phasen des Lebenszyklus der Produktdaten, insbesondere die Fertigung und die Datenmigration. Zur Analyse der Datenqualität steht eine große Anzahl von Programmen zur Verfügung. Doch divergierende numerische Ergebnisse bei der Analyse von identische CAD Modellen machen eine a posteriori Unsicherheit über die Genauigkeit der Programme und der Datenqualität deutlich.

Die vorgestellte Methode reduziert diese Unsicherheit und erlaubt eine quantifizierbare Aussage über die Genauigkeit von Analyseprogrammen, sowohl für den Verifikations- als auch für den Validierungsprozess von 3D-CAD Geometrien. Hierdurch kann die erfolgreiche Implementierung von Standards, wie ISO 10303-203, -214, -242 und ISO 14306 beschleunigt werden.

**Abstract:** 3D explicit CAD models are never exact but include an a priori uncertainty with regard to the modelling intention. This deviation is usually described as CAD data quality. It affects all subsequent phases in the product data life cycle such as manufacturing processes and data migration. In order to guarantee a maximum data quality, a large number of data quality tools has been developed. All available tools propose different numerical results for the same set of CAD models so that an a posteriori uncertainty about the accuracy of data quality tools and the CAD model remain.

In this paper, we propose a methodology for the comparison of data quality tools both for the verification and the validation process of CAD models. The major findings make it possible to distinguish different references for the verification and the validation process in order to reduce the a posteriori uncertainty about the accuracy of data quality tools thus of CAD models. This allows a faster implementation of standards such as ISO 10303-203, -214, -242 and ISO 14306.

**Stichwörter:** Unsicherheit, CAD, Datenqualität, Verifikation, Validierung, Ontologie

**Keywords:** Uncertainty, CAD, data quality, verification, validation, ontology

## 1 Einleitung

Ziel ist die Untersuchung der Datenqualität von expliziten 3D-Geometrien. Um die häufig verwendeten Boundary-Representation-Modelle auf Fehler prüfen zu können, müssen die dazu verwendeten Messmittel im Vorfeld auf ihre Genauigkeit überprüft werden.

Hierzu werden häufig Referenzgeometrien mit bekannten Fehlern und Eigenschaften verwendet. Die Entwicklung dieser Testkörper ist jedoch aufwendig und repräsentiert nicht zwangsläufig die Fehler, die auch im täglichen Konstruktionsprozess auftreten. Eine andere Möglichkeit besteht in der Verwendung von bereits existierenden CAD Daten. Dies hat zusätzlich den Vorteil, dass Vergleiche von Analyseprogrammen über eine große Anzahl von Modellen zu statistisch relevanten Aussagen verdichtet werden können.

Da bei diesem Vorgehen aber a priori weder die Fehler in den CAD Daten, noch die Genauigkeit der Analyseprogramme bekannt sind, wird im Folgenden eine Methode zur Reduzierung dieser Unsicherheit vorgestellt. Zur Herleitung der Methode werden der Begriff der Unsicherheit, sowie der Begriff der Datenqualität vorgestellt. Darauf aufbauend wird die Methode zur Beherrschung von Unsicherheit in expliziten 3D-CAD-Geometrien beschrieben und die Übertragbarkeit in eine Ontologie diskutiert. Im Anschluss daran werden mögliche Forschungsrichtungen aufgezeigt und die Ergebnisse zusammengefasst.

## 2 Unsicherheit in lasttragenden Systemen

Während Konstrukteure deterministische Werte in das CAD-System eingeben, geschieht schon die rechnerinterne Speicherung in Form eines approximierten Wertes, der nicht mehr der Modellierungsintention entsprechen muss. Es herrscht Unsicherheit über die Größe der Abweichung zwischen Soll- und Ist-Geometrie, sowie über die Wirkung dieser Abweichung auf nachgelagerte Prozesse. Diese Unsicherheit nimmt mit jeder Migration oder Konvertierung der Daten zu, da die Repräsentation von CAD-Daten nicht nur zwischen unterschiedlichen Formaten variiert, sondern auch zwischen unterschiedlichen Versionen des gleichen Formats. So können beispielsweise Linien durch Kurven höherer Ordnung approximiert werden.

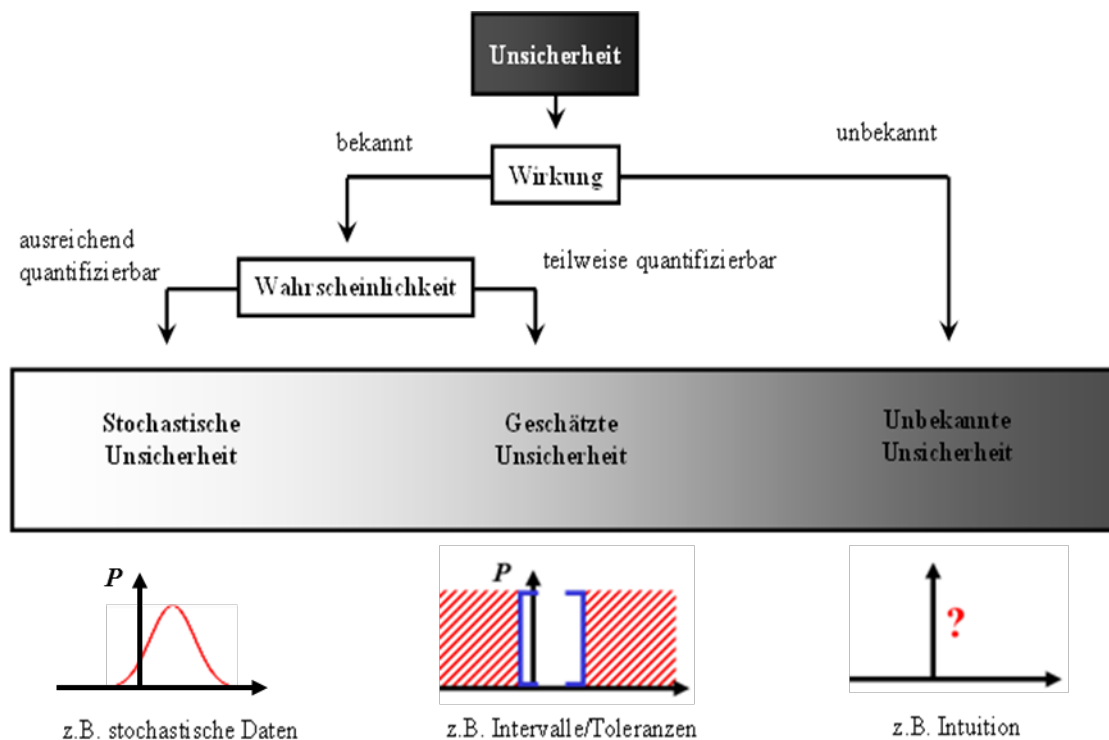


Abbildung 1: Typen von Unsicherheit vgl. [1]

Aufbauend auf der Unterscheidung von aleatorischer und epistemischer Unsicherheit wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 805 die in Abbildung 1 dargestellte Typisierung von Unsicherheiten in lasttragenden Systemen vorgenommen. Hierbei wird in erster Linie zwischen parameterisierbaren bzw. quantifizierbaren Wirkungen und nicht parameterisierbaren bzw. unbekannten Wirkungen unterschieden. Letztere Wirkung implizierte eine unbekannte Unsicherheit. Die Wirkungen mit bekannten Wahrscheinlichkeiten können wiederum nach dem Grad der zu Verfügung stehenden Informationen auf stochastische oder geschätzte Unsicherheit abgebildet werden [1].

### 3 Prozesskette zur Standardisierung von CAD-Daten

Autorensysteme zur Konstruktion von CAD-Modellen speichern Daten im eigenen Nativeformat. Zum Austausch der Daten empfiehlt sich die Verwendung eines Standardformats. Die Standardisierung des Datenaustauschs zwischen verschiedenen Autorensystemen ermöglicht die Reduktion der zu implementierenden Schnittstellen. Als Standardformat für CAD-Daten werden insbesondere JT und STEP verwendet [2] [3].

Um die Daten des jeweiligen Autorensystems in ein Standardformat zu überführen, müssen die Nativdaten interpretiert und in die verfügbaren Entitäten des Standardformats überführt werden. Dieser Vorgang kann zu Qualitätsproblemen und abweichenden Geometrien führen. Eine Überprüfung des Ergebnisses der Konvertierung ist daher unerlässlich. Die Überprüfung kann in die Verifikation und die Validierung unterteilt werden, die in Abschnitt 4 erläutert werden. Die Prozesskette zur Konvertierung von CAD-Daten in ein Standardformat ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: Prozesskette zur Überführung von CAD-Daten in ein Standardformat

In der Prozesskette bestimmt die Verifikation die Datenqualität der nativen CAD-Daten. Nach der Konvertierung erfolgt die Verifikation des Standardformats, sowie der Vergleich der geometrischen Eigenschaften von Nativ- und Standardformat.

## 4 CAD-Datenqualität und Modelleigenschaften

Im Folgenden wird genauer auf die Methoden zur Bestimmung der CAD-Datenqualität und der Modelleigenschaften eingegangen. Abschließend wird die vorgestellte Prozesskette hinsichtlich der vorherrschenden Typen von Unsicherheit charakterisiert.

### 4.1 Methoden zur Bestimmung der Datenqualität und der Modelleigenschaften

Zur Bestimmung der Datenqualität und der geometrischen Modelleigenschaften haben sich die Methoden der Verifikation und der Validierung etabliert. Die vorgestellten Verfahren zur Bestimmung der Gleichheit zweier CAD Modelle stellen einen Spezialfall der Ähnlichkeitsanalyse dar [4]. Bei der Verifikation wird die Datenqualität durch einen Vergleich der CAD-Daten mit einem gegebenen Regelkatalog ermittelt. In diesem sind die zu prüfenden Entitäten und Grenzwerte festgelegt. Ein Regelkatalog ist durch die Strategic Automotive product data Standards Industry Group (SASIG) vorgeschlagen worden [5].



Als Beispiel für die geometrischen Qualitätskriterien soll die Krümmungsunstetigkeit bzw. G2-Unstetigkeit dienen. Diese findet häufig Verwendung bei der Analyse der Lichtreflexionen auf Karosserien. Für die in Formel (1) dargestellte G2-Unstetigkeit wird eine Schnittebene in Normalenrichtung der zu vergleichenden Flächen erzeugt. Die Radien  $R_1$  und  $R_2$  beschreiben die Krümmung der zwei Flächen in der Schnittebene, siehe Abbildung 3. Liegt die Krümmungsunstetigkeit über dem gegebenen Grenzwert, wird für die entsprechende Entität ein boolescher Wert für einen identifizierten Fehler gespeichert.

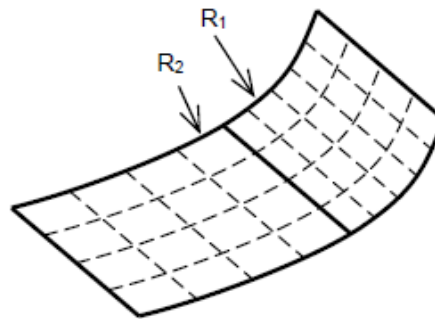


Abbildung 3: Krümmungsunstetigkeit G-SU-NS aus [5]

$$T_{G-SU-NS} \leq \frac{2|R_1 - R_2|}{|R_1| + |R_2|} \quad (1)$$

Bei der Validation werden geometrische Eigenschaften eines Referenz-Modells im Nativformat und eines Derivats im Standardformat verglichen. Da die Geometrie des Modells durch die Konvertierung nicht verändert werden sollte, liegen der Prüfung gewöhnlich zwei identische oder ähnliche CAD-Modelle in unterschiedlichen Dateiformaten zu Grunde.

Die geometrischen Validierungseigenschaften beschreiben, ähnlich wie ein Fingerabdruck, repräsentative Teilaspekte eines CAD-Modells. Übliche Validierungseigenschaften für explizite 3D Geometrien sind die Oberfläche, das Volumen, die Schwerpunktkoordinaten und die Kurvenlänge eines Körpers.

Eine Erweiterung des vorgestellten Konzepts für die Validierung auf Punktwolken ist angedacht. Hierbei erlaubt insbesondere die Möglichkeit der Lokalisierung der Abweichungen eine Erhöhung der Aussagekraft der Validierungsergebnisse. Die applikationsübergreifende Identifikation und Zuordnung der jeweiligen Entitäten stellt hierbei eine besondere Herausforderung dar, vgl. [6].

## 4.2 Unsicherheit bei der Bestimmung der Datenqualität

Entlang der Prozesskette zur Standardisierung von CAD-Daten können 6 a priori intuitive Unsicherheiten identifiziert werden. Im Folgenden wird die Reduzierung der Unsicherheit durch deren Überführung in a posteriori stochastische Unsicherheiten beschrieben:

- 1) Die Datenqualität der CAD-Modelle im Nativ- und Standardformat kann über die Art und die Anzahl geometrischer Fehler stochastisch beschrieben werden.
- 2) Die Unsicherheit über die Qualität eines Konverters kann durch die Art und die Anzahl von Verifikations- und Validierungsfehlern stochastisch beschrieben werden.
- 3) Die Abhängigkeit der Verifikations- und Validierungsprüfkriterien untereinander kann ebenfalls quantifiziert werden. Dies ist Schwerpunkt laufender Forschung.
- 4) Die Unsicherheit über die Qualität der Verifikationstools kann über die Art und die Anzahl falscher Prüfergebnisse in stochastische Unsicherheit reduziert werden.
- 5) Die Reduzierung der Unsicherheit über die Qualität der Validierungstools folgt 4).
- 6) Die Unwissenheit über die Implementierung der Algorithmen der Verifikations- und Validierungssoftware kann im Rahmen dieser Arbeit nicht reduziert werden.

Im Folgenden wird die Reduzierung der Unsicherheiten 1), 2), 4) und 5) erläutert.

## 5 Methode zur Beherrschung der Unsicherheit in der Datenqualität

Die Unsicherheit akkumuliert sich im Verlauf der Prozesskette. Hierbei sind die Unsicherheit über die Datenqualität der CAD-Modelle und die Unsicherheit über die Qualität eines Konverters, eines Verifikations- und Validierungstools voneinander abhängig. Kern der Methode ist die Verwendung mehrerer Konverter, Verifikations- und Validierungstools. Mit Hilfe der vorgestellten Annahmen können die Tools anhand ihrer Fehlergrößen verglichen werden. Anschließend wird die Aussagekraft der Ergebnisgrößen diskutiert.

### 5.1 Annahmen über die Datenqualität des nativen Formats

Um die Interdependenz zwischen der Datenqualitäts- und Bewertungsunsicherheit aufzulösen, können Annahmen getroffen werden, die eine Quantifizierung der Unsicherheit erlauben. Hierzu können die vom Autorensystem errechneten Geometrischen Validierungseigenschaften (GVPs) des CAD-Modells im nativen Format herangezogen werden.

Die Berechnung eines Mittelwertes verschiedener Validierungsergebnisse stellt hierzu eine Alternative dar. Diese entfernt jedoch den Referenzwert von der Modellierintention des Konstrukteurs. Wenn das Autorensystem eine Verifikation unterstützt, können auch hier die Ergebnisse des Autorensystems als Referenzwerte verwendet werden. Die Verwendung von Minimal-, Maximal- oder Mittelwerten würde wiederum einen Fehler in die Analysekette einführen, dessen Ursache nicht eindeutig bestimmbar wäre.

## **5.2 Annahmen über die Datenqualität des Standardformats**

Um den Einfluss des Konverters bestimmen zu können, werden die Ergebnisse der jeweiligen GVP-Berechnung über alle Validierer gemittelt. Bei der Verifikation minimiert die Verwendung des Maximalwerts die Negative Falsch Wahrscheinlichkeit, d.h. Fälle, in denen Fehler nicht erkannt werden. Da die Implementierungen der Algorithmen nicht offen gelegt sind, können hierdurch jedoch keine Positiv Falsch Ereignisse ausgeschlossen werden, d.h. Fälle in denen korrekte Geometrien fälschlicherweise als Fehler identifiziert werden. Die Verwendung des Minimalwerts würde dagegen die Positiv Falsch Wahrscheinlichkeit minimieren und die Negativ Falsch Wahrscheinlichkeit maximieren. Durch die Verwendung des Mittelwerts werden sowohl Positiv als auch Negativ Falsch Ergebnisse berücksichtigt, so dass hierauf aufbauende Analysen keine Einschränkung der Fehlerursache erlauben würden. Die Verwendung des Maximalwerts als Referenz für die Verifikationsergebnisse erscheint am geeignetsten, da die tatsächliche Fehlerzahl unbekannt ist und Positiv Falsch Ereignisse, anders als Negativ Falsch Ereignisse, im jeweiligen CAD-Modell überprüft werden können.

## **5.3 Aggregation der Daten und Berechnung der Fehlergrößen**

Auf der Grundlage der getroffenen Annahmen kann in fünf Schritten verfahren werden:

- 1) Treffen der Annahmen über die geometrischen Eigenschaften und die Qualität des jeweiligen Modells im Nativ- und Standardformat.
- 2) Aggregation der Daten: Mit den getroffenen Annahmen kann bei jedem zu prüfenden Modell sowohl für die GVPs der Validierung, als auch für die Prüfkriterien der Verifikation ein Referenzwert für das Standardformat erzeugt werden. Hierdurch kann die Datenqualität nach dem Konvertierungsprozess bestimmt werden.

- 3) Berechnung des Einflusses der Konverter: Durch den Vergleich der Referenzwerte für das Standardformat mit den angenommenen Werten des nativen Formats kann der Einfluss jedes Konverters auf die Datenqualität errechnet werden.
- 4) Berechnung des Einflusses der Verifikations- und Validierungstools: Hierfür werden die Prüfergebnisse der einzelnen Verifikations- und Validierungstools mit den Referenzwerten verglichen. Abbildung 4 stellt die Schritte 3) bis 4) dar.
- 5) Wiederholung der Schritte 2) bis 5) bis die Ergebnisse konvergieren: Hierzu können die Werte des Autorensystems durch die Werte der genauesten Verifikations- und Validationssoftware ersetzt werden. Weiterhin können als ungenau klassifizierte Tools ausgeschlossen werden.

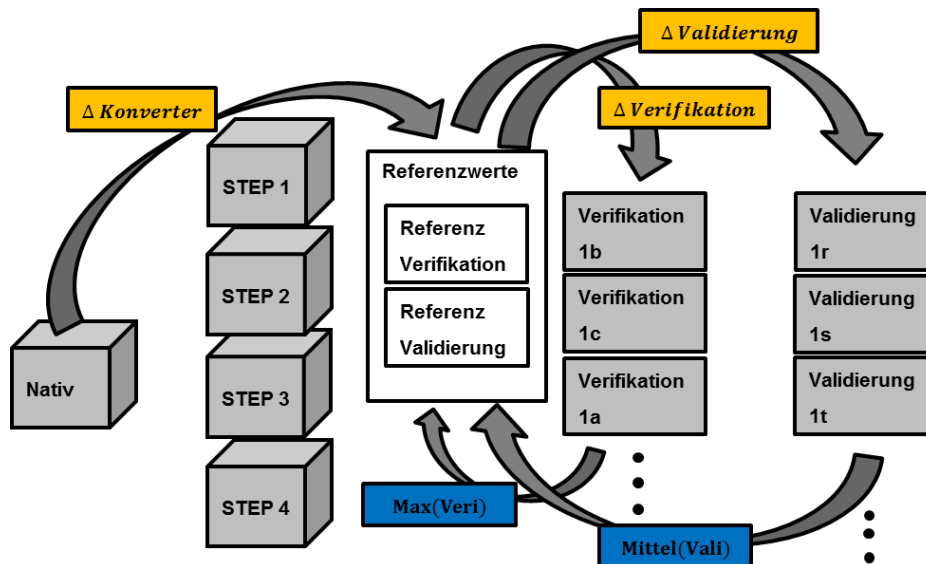


Abbildung 4: Aggregation der Daten und Berechnung der Fehler

## 5.4 Ontologiebasierte Repräsentation der Unsicherheitsdatentypen

Zur Reduzierung der Unsicherheit beim Austausch und bei der Bewertung der Testdaten ist ein gemeinsames Verständnis der Begriffe wichtig. Wie in [7] beschrieben können Ontologien verwendet werden, um Prozesswissen mit unsicherheitsbehafteten Produkteigenschaften zu verknüpfen und logisch verarbeitbar zu repräsentieren.

$$\text{Proz: CADQualifikation} \equiv \text{Quali: Konv} \sqcup \text{Quali: Veri} \sqcup \text{Quali: Vali} \sqcup \text{Quali: CADModell} \quad (2)$$

$$\text{CADEigenschaft} \sqsupseteq \{\text{Eigen: Verifikation}, \text{Eigen: Validierung}\} \quad (3)$$

$$CADEigenschaft \equiv \text{PlstEigen} \sqcap (\exists \text{IstRealisiertIn. Proz: CADQualifikation}) \quad (4)$$

Das in [7] vorgestellte Konzept kann um die Prozessinstanz *Proz: CADQualifikation* erweitert werden (2). Die Eigenschaften des CAD Modells in (3) stellen Ist-Eigenschaften einer erweiterten Produktdefinition dar, die im Qualifikationsprozess realisiert werden (4).

## 5.5 Interpretation der Ergebnisse

Da die Berechnung der Fehler der jeweiligen Verifikations- und Validierungstools auf den Referenzwerten aufbauen, hängt der Aussagewert von den getroffenen Annahmen ab. Bei der Validierung werden modellbedingt auch fehlerhafte oder ungenaue Werte berücksichtigt. Die Filterung von statistischen Ausreißern und die Gewichtung der verbleibenden Werte können den Aussagewert erhöhen. Bei der Verifikation werden auch Falsch-Positiv-Ereignisse einbezogen. Bei gegebenem CAD-Modell kann eine hohe Varianz der identifizierten Fehlertypen als Indikator für Falsch-Positiv-Ereignisse herangezogen werden. Diese werden nach jeweiliger Überprüfung sukzessive ausgeschlossen.

## 6 Ausblick

Die Betrachtung des Maximalwerts bei der Verifikation hat den Vorteil, dass man für eine gegebene Anzahl von Verifikationsverfahren die Wahrscheinlichkeit von Negativ Falsch Ergebnissen minimiert. Positiv Falsch Ergebnisse können hierdurch nicht ausgeschlossen werden. Hierfür eignet sich die Bottom-Up-Analyse der Implementierung des Verifikationsverfahrens. Der Vergleich und die Standardisierung von Analysealgorithmen bieten anwendungsnahe Forschungsmöglichkeiten. Hier gilt es insbesondere die Korrelation von Prüfkriterien zu beschreiben und wichtige von unwichtigen Analysealgorithmen zu unterscheiden. Um die Unsicherheit bei der Validierung zu reduzieren, kann der Einfluss von ungenauen Prüfergebnissen durch die Verwendung von gewichteten Mittelwerten gesenkt werden. Für eine kontinuierliche Verteilung der diskreten Prüfergebnisse um den fiktiven Referenzwert an, kann das vorgestellte Modell z.B. Schätzer für die maximale Wahrscheinlichkeit der Referenzwerte erweitert werden, um die Analysequalität weiter zu verbessern [8]. Darüber hinaus können weitere Prüfkriterien wie Punktwolken in die Methodik aufgenommen werden. Eine systematische Bestimmung von Grenzwerten für die Identifikation unzureichender Datenqualität bietet ebenfalls Forschungsbedarf.

## 7 Fazit

Die vorgestellte Methode reduziert die Unsicherheit über die Qualität von Konvertern und Analyseprogrammen zur Verifikation und Validierung von CAD-Daten. Hierdurch kann die Unsicherheit über die Datenqualität von expliziten 3D-Daten in Standardformaten reduziert werden. Die Methode ermöglicht die Quantifizierung von Abweichungen bezüglich der zwei Qualitätsprüfungsverfahren Verifikation und Validierung. Zukünftige Arbeiten bieten sich an in der Entwicklung von Verfahren zur Quantifizierung der Positive-Falsch-Ergebnisse und in der Standardisierung von Analysealgorithmen.

## Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung des Projekts im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 805.

## Literatur

- [1] Engelhardt, R.A.; Koenen, J.F.; Enss, G.C.; Sichau, A.; Platz, R.; Klobardanz, H.; Birkhofer, H.; Hanselka, H.: *Proceedings of the 1st International Conference on Modeling and Management of Engineering Processes : A Model to Categorize Uncertainty in Load-Carrying Systems*. 1. Aufl. Berlin: Springer, 2010.
- [2] Norm ISO 14306: *Industrial automation systems and integration – JT file format specification for 3D visualization*. Beuth, 2012.
- [3] Norm ISO 10303-203: *Product data representation and exchange – Part 203*. Beuth, 2011.
- [4] Cardone, A.; Gupta, S. K.; Karnik, M.: *A Survey of Shape Similarity Assessment Algorithms for Product Design and Manufacturing Applications*. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. Vol. 3. S. 109-118. 2003.
- [5] Richtlinie VDA 4955: *Umfang und Qualität von CAD/CAM-Daten*. 2006.
- [6] Brière-Côté, A.; Rivest, L.; Maranzana, R.: *3D CAD Model Comparison: An Evaluation of Model Difference Identification Technologies*. *Computer-Aided Design and Applications*. Vol. 10 (2). S.173-195. 2013.
- [7] Sprenger, A.; Mosch, L.; Anderl, R.: *Bereitstellung von Prozesswissen zur Beherrschung von Unsicherheit lasttragender Systeme*. In: *Integrierte Produktentwicklung für einen globalen Markt*. Aachen. Shaker. 2011.
- [8] Goldberger, A.: *Maximum Likelihood Estimation of Regressions Containing Unobservable Independent Variables*. *International Economic Review*. Vol. 13. S.1-15. 1972.

## Potenzial der bildgebenden Digitalisierverfahren im Maschinenbau

Dirk Hofmann, Philipp Sembdner, Stefan Holtzhausen, Christine Schöne,  
Ralph Stelzer

Technische Universität Dresden

Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD,  
01062 Dresden

E-Mail: Dirk.Hofmann@tu-dresden.de; Internet: <http://www.tu-dresden.de>

**Inhalt:** Im folgenden Beitrag wird ein am Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD entwickeltes Werkzeug vorgestellt, welches neue Methoden der Bauteilanalyse und -auswertung mittels CT-Daten aufzeigt. Am Beispiel einer Lötverbindung werden aktuelle Problemstellungen und Möglichkeiten der CT-Datenauswertung veranschaulicht und visualisiert.

**Abstract:** In this article a tool currently developed by the chair of engineering design and CAD is presented, showing new methods of component analysis and the evaluation specifically of CT data. Using the example of a brazed pipe connection, current problems and possibilities are illustrated and visualized.

**Stichwörter:** Computertomographie, Digitale Bildverarbeitung, Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung

**Keywords:** cone beam computed tomography (CBCT), digital image processing, non-destructive material testing

### 1 Motivation

Seit einigen Jahren werden verstärkt zerstörungsfreie Verfahren zur Qualitätsanalyse und zur Gewährleistung der betrieblich vorgegebenen Produktionsrichtlinien eingesetzt [1]. Vorrangig sind das optische 3D-Messsysteme zur berührungslosen Vermessung von Bauteilgeometrien und -oberflächen aber auch zunehmend Verfahren wie die Computertomographie (CT), welches ursprünglich aus dem medizinischen Bereich stammt [2]. Im technischen Umfeld ergibt sich das Potenzial dieser Anlagen aus einer hohen Genauigkeit, einer hohen Erfassungsgeschwindigkeit, der Eigenschaft innere Bauteilstrukturen zerstörungsfrei erfassen zu können sowie einer größeren Flexibilität gegenüber konventionellen Verfahren.

Die gestiegenen Rechenleistungen von Computersystemen in den letzten Jahren machen zudem die Bildauswertung als auch die 3D-Modellerstellung aus Schichtbildern bild-

gebender Verfahren interessant. Mit Hilfe grundlegender Algorithmen der Bildverarbeitung sowie der 3D-Datenauswertung ist es möglich, eigene anwendungsspezifische Analyse-, Visualisierungs- und Auswertewerkzeuge zu erstellen [3]. Gleichmaßen gelten im Maschinenbau andere Anforderungen an das Verfahren gegenüber dem medizinischen Umfeld hinsichtlich der Festlegung der Messaufgabe und Strategie sowie der Betrachtung der Messunsicherheit [4]. Es gilt somit, effiziente Auswertestrategien für die Daten bildgebender Verfahren zu entwickeln um neue Wege der Qualitätssicherung und Prozessoptimierung zu erschließen [5].

Im folgenden Beitrag sollen mithilfe der am Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD der TU Dresden entwickelten Algorithmen und Softwarebibliotheken anhand einer Rohrverbindung grundlegende Abläufe gezeigt sowie verschiedenen Szenarien der Bauteilprüfung und -bewertung vorgestellt werden [5].

## **2 Computertomographie im industriellen Umfeld**

Die Computertomographie ist ein bildgebendes Verfahren, welches im Ergebnis einen Stapel von Schichtbildern hat. Jeder Bildpunkt eines CT-Schichtbildes (Pixel) wird in Grauwerten angegeben und zusammen mit dem Schichtbildabstand als Volumenelement (Voxel) definiert. Diese Daten liegen in der Regel im DICOM-Format vor, das sich aus medizinischen Anwendungen heraus entwickelt hat. Im industriellen Umfeld werden die Bilder häufig auch als Rohdaten (RAW) oder in einem standardisierten Bildformat (z. B. TIFF) abgelegt. Durch die veränderten Aufnahmebedingungen im technischen Bereich wie höheren Strahlungsintensitäten oder längeren Aufnahmezeiten entstehen jedoch auch deutlich größere Datenmengen, welche nach wie vor schwer zu handhaben und zu bearbeiten sind. Entweder, es stehen leistungsstarke Rechensysteme zur Verfügung die derartige Datenmengen verarbeiten können, oder die Datengröße muss reduziert werden, was unter Umständen zu einem Verlust der Genauigkeit und somit Informationen führen kann. Dabei wäre die Entnahme einzelner Schichten aus dem Bildstapel, die Reduzierung der Bildauflösung bzw. das Zuschneiden des Bildes im interessierenden Bereich oder die Verringerung der Farbtiefe denkbar, um diesem Problem zu begegnen [3].

Aber auch die Entwicklung performanter Algorithmen und Werkzeuge bei der Bearbeitung, Interaktion und Weiternutzung dieser Daten stellt eine sinnvolle Alternative zu den bisher kommerziell verfügbaren Softwaresystemen dar. Diese Systeme beschränken sich



in Ihrem Leistungsumfang größtenteils auf den Import und die Visualisierung von CT-Daten, die Segmentierung und den Export als ISO-Flächenmodell. Die Bearbeitung in verfügbaren Softwaresystemen erfolgt zumeist auf eben diesen diskreten Flächenmodellen, die aufgrund einer Schwellwertfestlegung durch einen Daten- bzw. Informationsverlust gekennzeichnet sind [6]. Eine Bearbeitung direkt auf voxelbasierten Datensätzen mit kommerziell verfügbaren Systemen ist bisher nur eingeschränkt möglich.

### 3 Methoden der Bauteilanalyse am Beispiel einer Lötverbindung

Abhängig von der Aufgabe, kann die Art der Bauteiluntersuchung und -auswertung auf verschiedenen Repräsentationsebenen erfolgen. Im vorliegenden Beispiel einer gelöteten Rohrverbindung werden Voxeldaten als Repräsentation genutzt. Die Grundlage dieser Betrachtungen bildet ein Datensatz einer Micro-CT-Aufnahme im RAW-Format. Seitens des Herstellers der Rohrverbindung besteht die Anforderung darin, dass die Lötstellen hinsichtlich der Anzahl und Größe von Lunkern bzw. Luft einschlüssen (Flächeninhalt pro Bild, Volumen im Bildstapel) geprüft werden müssen, um die Vorgabe eines geschlossenen Lötkreises von ca. 3-4 mm zu garantieren. Diese Forderung war mit bisherigen Verfahren nicht zerstörungsfrei messbar [4]. Für die Lösung kann das Vorgehen dabei in folgende Schritte untergliedert werden (Abbildung 1):

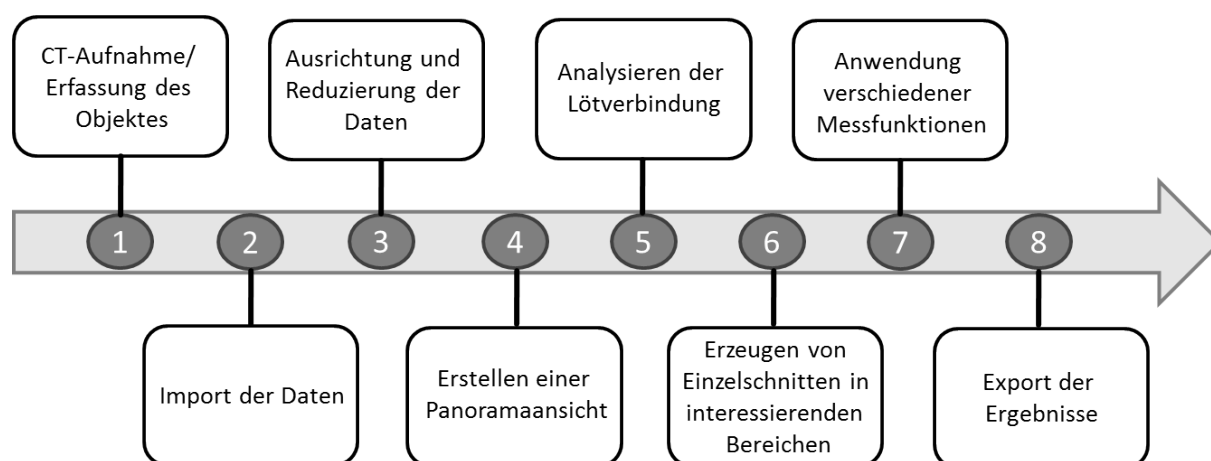


Abbildung 1: Ablauf des Analyseprozesses

Nach der Digitalisierung des Bauteils erfolgt der Import der CT-Daten über eine Benutzeroberfläche (GUI). Aufgrund der immensen Datenmenge, welche bei diesem Erfassungsverfahren entsteht, kann in einem ersten Schritt durch die Reduzierung der Bildan-

zahl die Größe des Datensatzes verkleinert werden. Dazu werden mithilfe einer Voransicht der einzelnen Schichten und einer gezielten Auswahl (Checkbox) nur die für eine Analyse relevanten Schichtbilder durch den Anwender selektiert. Schichtbilder, die keine relevanten Informationen (Grauwert sehr klein, dunkle Bereiche im Bild) liefern, bleiben unberücksichtigt. Dabei ist jedoch wichtig, dass nur zusammenhängende Bereiche gewählt werden, um eine Homogenität des Datensatzes zu gewährleisten (Abbildung 2).

Die in Abbildung 2 dargestellte Bildvorschau zeigt, dass das digitalisierte Bauteil nur einen kleinen Bereich des verfügbaren Messvolumens beansprucht, so dass große Teile der Einzelschichtbilder Bereiche aufweisen, die keine wesentlichen Informationen liefern. Demzufolge erscheint es sinnvoll, den Datensatz nicht nur in der Anzahl der Bilder sondern auch die Größe aller Bilder des Schichtbildstapels zu reduzieren. Um jedoch einen sinnvollen Zuschnitt der Bilder zu realisieren, muss zunächst die Bauteillage im CT-Datensatz auf korrekte Ausrichtung geprüft werden. Diesen Schritt zeigt Abbildung 3.

Die Ausrichtung und Begrenzung des Datensatzes erfolgt über eine Art Röntgenansicht durch den gesamten Schichtbildstapel in den drei kartesischen Hauptachsen. Zur Erzeugung dieser Ansicht werden im konkreten Fall für jede Hauptachsenrichtung Bilder in einem definierten Abstand (z. B. aller 10 Pixel) aus dem Bildstapel entnommen. Anschließend werden korrespondierende Pixel aller Schichtbilder (Pixel an gleicher Bildposition) mit ihren Grauwerten und einer einstellbaren Wichtung aufsummiert. Dieses Verfahren ist auch mit gekrümmten Schnittbildern möglich (Abbildung 6) [7].

In Abbildung 3 ist ersichtlich, dass das Rohr bezüglich der Zylinderachse schräg im Koordinatensystem des CT-Datensatzes liegt. Dies kann zwei Ursachen haben. Zum einen wurde das Bauteil bewusst schräg in das Aufnahmegerät eingelegt um z. B. die Gefahr einer Artefaktbildung während der Aufnahme zu reduzieren. Zum anderen kann dies auch unbewusst geschehen sein, durch z. B. eine schlecht ausgeführte oder montierte Bauteilaufnahme.

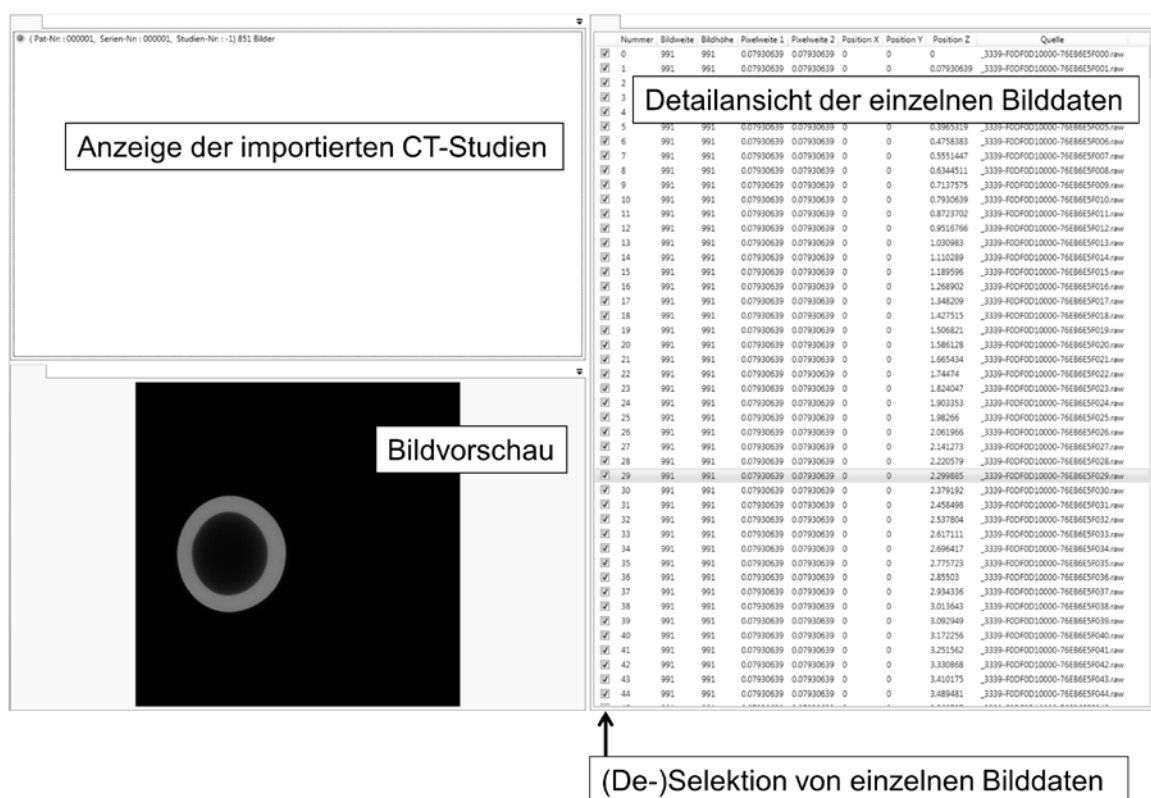


Abbildung 2: Importieren der CT-Daten

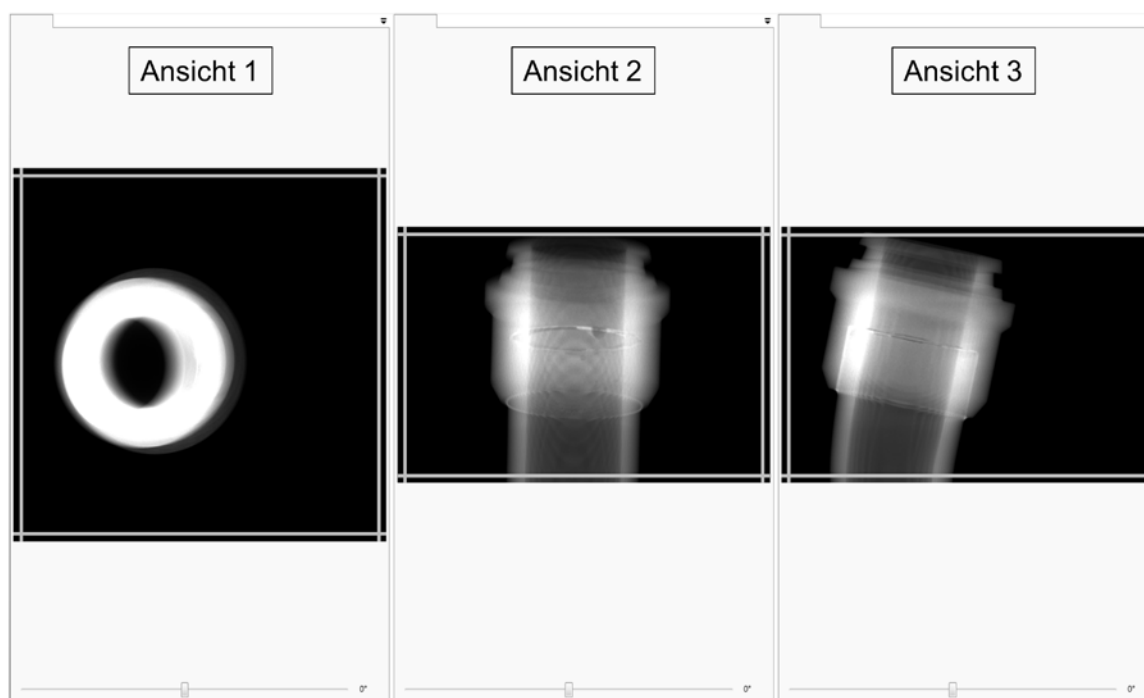


Abbildung 3: Visualisierung der eingelesenen Schichten – Rohr unausgerichtet

Über einen Schieberegler kann der Anwender eine Drehung des Datensatzes um alle Hauptachsen vornehmen, so dass im konkreten Fall die Zylinderachse senkrecht im Bild des Betrachters liegt (Abbildung 4, Ansicht 3). Mithilfe dieser Winkelinformationen wird ein neues Koordinatensystem bestimmt und im Anschluss ein neuer ausgerichteter Bildstapel generiert. Dieser verfügt über die gleichen Erzeugungsparameter (z. B. Pixelabstand und Schichtbildabstand) wie der Originaldatensatz. Im Anschluss kann über Begrenzungslinien ein Bereich gewählt werden der die wesentlichen Bauteilinformationen beinhaltet. In Ansicht 1 (Abbildung 4) ist das die Begrenzung des Rohres in der Draufsicht. In Ansicht 2 und 3 (Abbildung 4) wird nochmals der Datensatz entlang der Rohrachse reduziert, so dass nur Bereiche der Rohrverbindung im Umfeld der Lötstelle ausgewählt werden.

Im Ergebnis wird der finale, ausgerichtete und reduzierte Datensatz in verschiedenen Ansichten visualisiert (Abbildung 5). Unter anderem kann durch Bibliotheken, die am Lehrstuhl KTC entwickelt worden sind, eine dreidimensionale Volumenrendering-Darstellung des CT-Datensatzes erfolgen (Abbildung 5, rechts).

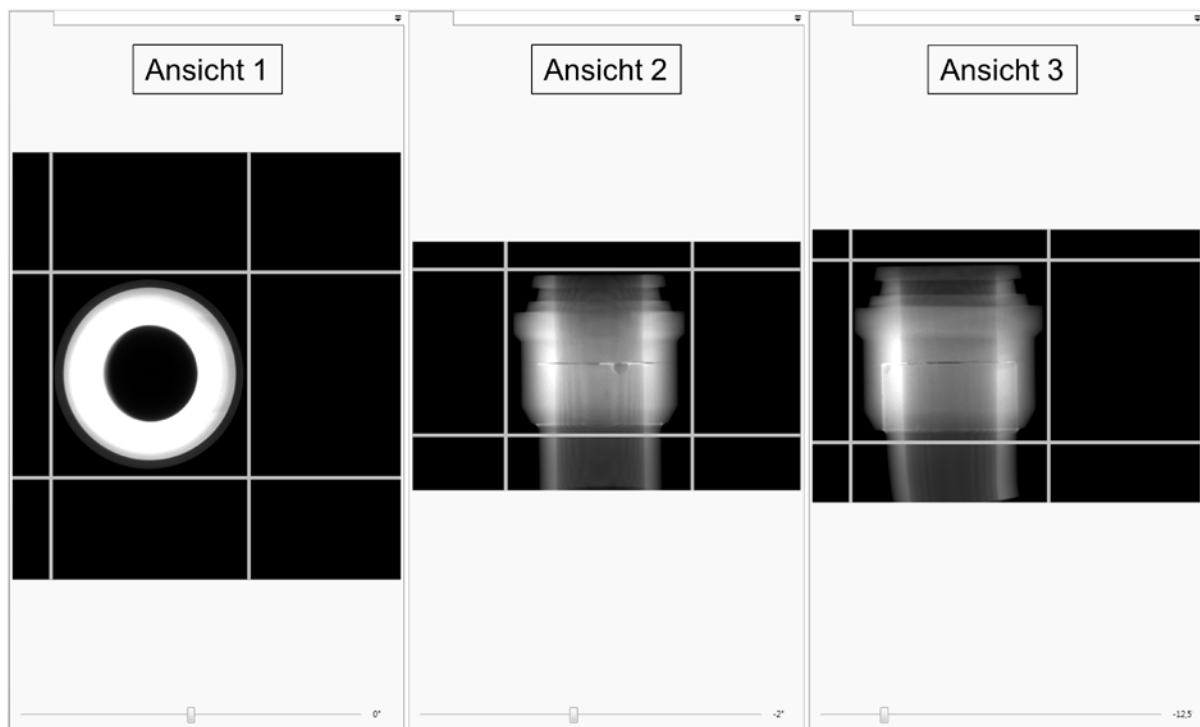


Abbildung 4: Ausrichtung und Reduzierung des CT-Datensatzes

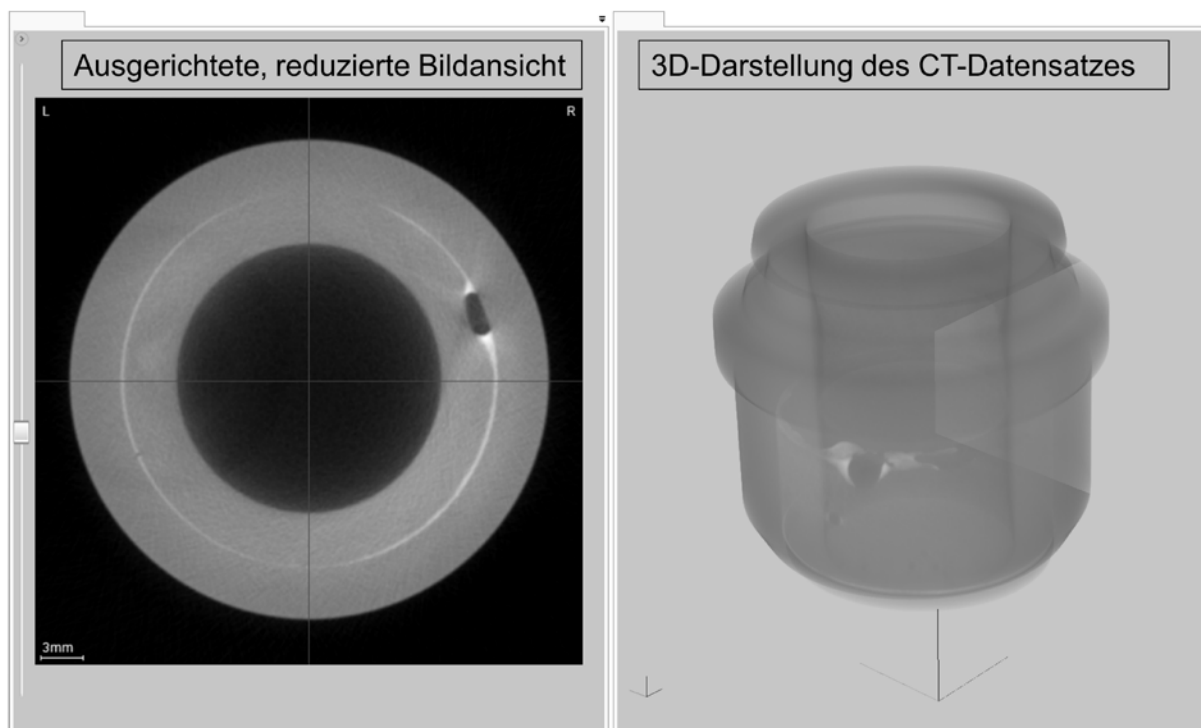


Abbildung 5: links - Visualisierung der Lötstelle als Draufsicht; rechts – 3D-Ansicht des Datensatzes

Es ist nunmehr möglich, direkt in den vorhandenen Schichtbilddaten Messungen vorzunehmen. Für eine sinnvolle Auswertung ist es jedoch notwendig, weitere gezielte Schnittbilder durch den Schichtbildstapel zu generieren. Mithilfe von Algorithmen, die am Lehrstuhl KTC entwickelt worden sind, können dafür beliebig gekrümmte und freigeformte Schnitte erzeugt werden. Diese Art der Schnittbilderzeugung erscheint besonders sinnvoll bei der Betrachtung und Auswertung von Rotationsteilen, um zu untersuchende Regionen in abgewickelter Form in einem einzigen erzeugten Schnittbild darstellen zu können (Abbildung 6: rechts).

Die Schnittgeometrien werden im Bildstapelkoordinatensystem z. B. durch Splineflächen (Bezier, Hermite, etc.) beschrieben. Durch Diskretisierung der Flächen können einzelnen diskreten Punkten Grauwertintensitäten zugeordnet werden. Die Berechnung der Grauwerte erfolgt durch Interpolation von benachbarten Voxeln im originalen Datensatz (z. B. trilinear oder trikubisch). Die Splinefläche wird durch zwei oder mehrere Kurven definiert, die in einzelnen Schichtbildern in verschiedenen Höhen festgelegt werden. Im betrachteten Beispiel wurden zwei Splinekurven, die annähernd einen Kreis abbilden, auf zwei Schichtbildern im Bereich der Lötverbindung definiert (Abbildung 6: links). Zwischen

den definierten Splinekurven wird im Anschluss die Splinefläche erzeugt, die nachfolgend in abgewickelter Form dargestellt wird (Abbildung 6: rechts).

Um einen größeren Bereich eines Bauteils (z. B. der Lötverbindung) abbilden zu können, werden zusätzliche Schnittflächen, im definierten Abstand zur bisher erzeugten Fläche, erstellt (Abbildung 6: rechts).

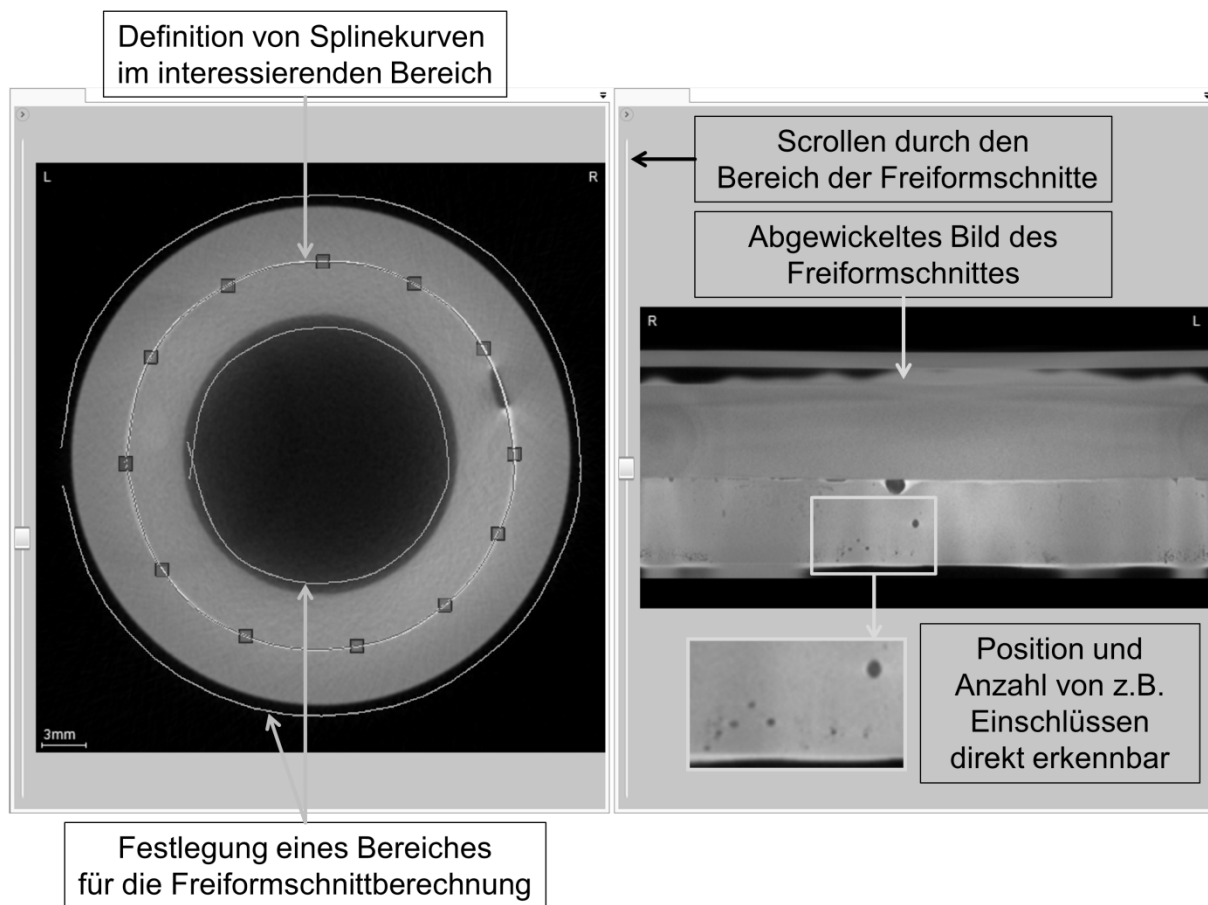


Abbildung 6: Erstellen des Freiformschnittes (links) – Panoramaansicht des Ergebnisses (rechts)

In den erzeugten Freiformschnitten sind die vorhandenen Einschlüsse direkt ersichtlich (Abbildung 6: rechts). Um diesen Bereich genauer betrachten zu können, kann mithilfe einer festzulegenden Drehachse im erzeugten Schnittbild (in Form einer Linie) die zu detektierende Stelle präziser untersucht werden. Über einen Schieberegler kann sich der Anwender um die Drehachse (im Bereich von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$ ) bewegen, wobei pro Schrittweite der Drehung ein neues Schnittbild mithilfe der Drehachse erzeugt wird (Abbildung 7: unten links). Daneben können weitere Schnittbilder erzeugt werden, die senkrecht zum erstellten Freiformschnitt angeordnet sind (Abbildung 7: oben rechts). Anschließend

können einfache Messaufgaben wie z. B. Längen und Winkelmessungen auf ebenen Schnittbildern durchgeführt und für eine Dokumentation gesichert werden (s. Abbildung 7).

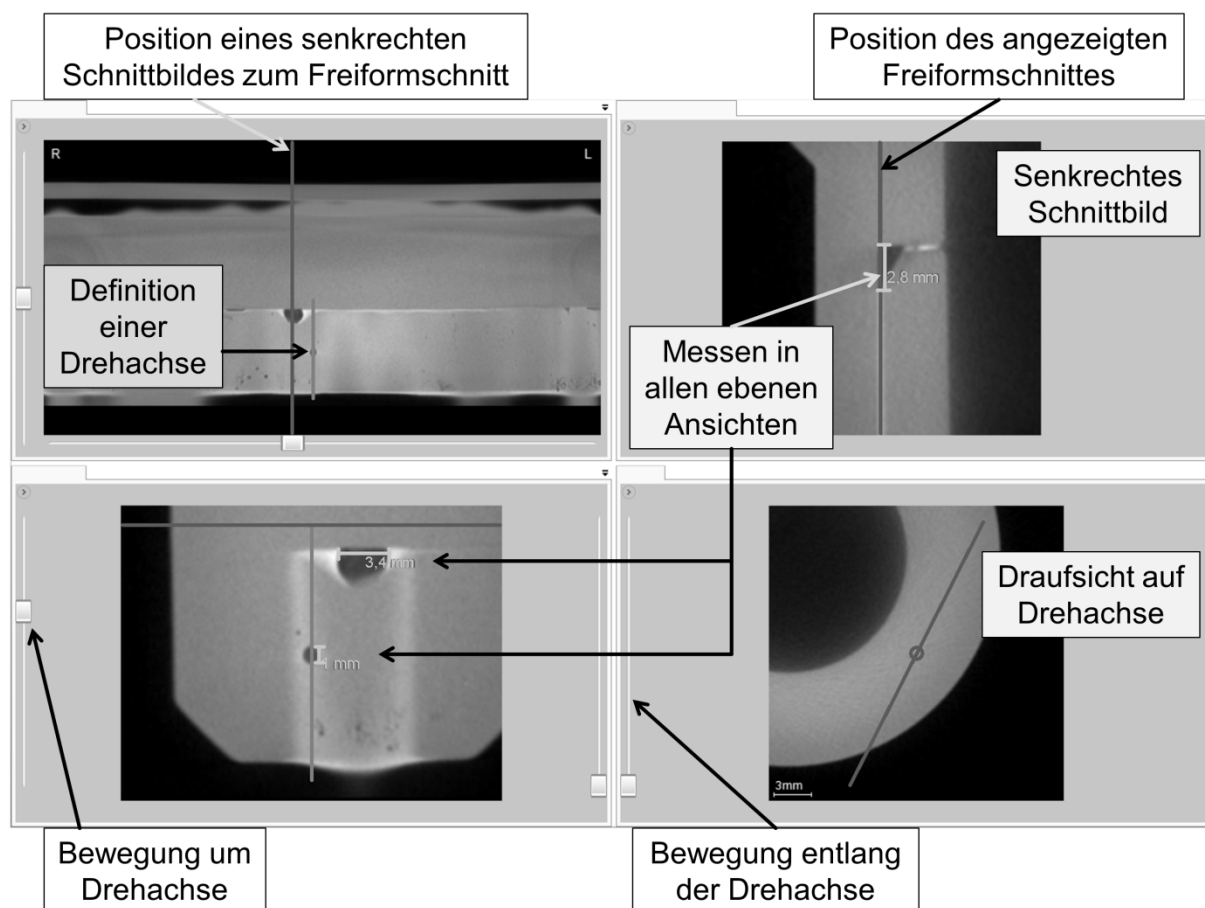


Abbildung 7: Auswertung der Lötverbindung

Diese Möglichkeiten der Bauteilanalyse und -auswertung können neben dem erläuterten Beispiel auch auf andere wie z. B. gegossene oder generativ gefertigte Bauteile angewendet werden. Dabei sind neben den beschriebenen Untersuchungen auch Analysen hinsichtlich der Porosität von Werkstoffen oder der Art und dem Aufbau innerer Strukturen (z. B. bei Schäumen, generativ gefertigten Bauteilen etc.) denkbar. Weiterhin ist es vorstellbar, dass der Ablauf zur Detektion und Bestimmung von Fehlstellen für eine Qualitätssicherung automatisiert werden kann, wenn mehrere Messungen gleicher Bauteile vorgenommen werden sollen. Voraussetzung ist, dass die Bauteile in gleicher Lage durch das Aufnahmegerät erfasst werden, so dass die Datensatzausrichtung und -reduzierung, die Schnittbildgenerierung und die Messaufgaben auf Grundlage der gleichen Koordinatentransformationen durchgeführt werden.

## 4 Zusammenfassung

Der Einsatz der Computertomographie im industriellen Umfeld weist ein großes Potenzial insbesondere für die berührungslose und zerstörungsfreie Erfassung nicht sichtbarer Bauteilbereiche auf. Durch die Nutzung und Anwendung bildgebender Verfahren besteht die Möglichkeit eine Vielzahl von Analysen und Auswertungen durchzuführen. Im vorliegenden Beitrag wurden am Beispiel einer Lötverbindung verschiedene Formen der Bauteilanalyse und -auswertung verdeutlicht. Das Beispiel zeigt, dass die Umsetzung effizienter Auswertestrategien wesentlich für die Prozessüberwachung und -automatisierung ist.

Eine in ihren Funktionen eingeschränkte Version zu der im vorliegenden Beitrag verwendeten Software (KTC DICOM Viewer) gibt es unter [www.re-dresden.de](http://www.re-dresden.de) (Stand: 08/2014).

## Literatur

- [1] Schöne, C.; Sembdner, P.; Hofmann, D.: Reverse Engineering im Werkzeug- und Formenbau, VDI-Z Integrierte Produktion, Special Werkzeug-/Formenbau November 2012, Springer VDI Verlag.
- [2] Werth Messtechnik GmbH.: <http://www.werth.de/de/navigation/presse/fachartikel/computertomografie.html>, 27.08.2014, 13:44Uhr.
- [3] Jähne, B.: Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung, 7. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, ISBN 978-3-642-04952-1.
- [4] Sembdner, P.; Holtzhausen, S.; Schöne, C.; Stelzer, R.: Möglichkeiten der Bauteiluntersuchung mittels Computertomographie, 15. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten, 3D-NordOst 2012, Berlin 2012, ISBN 978-3-942709-07-1.
- [5] Hofmann, D.; Sembdner, P.; Holtzhausen, S.; Schöne, C.; Stelzer, R.: CT data and processing potential for analysis of parts made by additive manufacturing, International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH 2014, Leiria, 10.-13.09.2014, Portugal.
- [6] Werth Messtechnik GmbH.: <http://www.werth.de/de/unser-angebot/produkte-nach-kategorie/software/winwerth.html>, 27.08.2014, 13:02Uhr.
- [7] Kramme, R. (Hrsg.): Medizintechnik: Verfahren – Systeme – Informationsverarbeitung, Springer Medizin Verlag Heidelberg 2007, S. 319, ISBN 3-540-41810-5.



# Integration einer Prüfmethode auf fertigungsgerechte Konstruktion für generative Fertigung in die virtuelle Produktentwicklung

Alexander Arndt, Sebastian Haag, Reiner Anderl

Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion, Technische Universität Darmstadt

Otto-Berndt-Str. 2, 64287 Darmstadt

E-Mail: {arndt, haag, anderl}@dik.tu-darmstadt.de; Internet: <http://www.dik.tu-darmstadt.de>

**Inhalt:** Generative Fertigungsverfahren unterliegen derzeit einer anhaltenden Weiterentwicklung. Dies zieht eine umfassende Betrachtung jener Verfahren aus Sicht der Forschung nach sich. Daher wird im vorliegenden wissenschaftlichen Beitrag neben einer kurzen Einführung zum Terminus ‚generative Fertigung‘ samt der digitalen Prozesskette und dem Aufzeigen von bereits bestehenden Gestaltungsrichtlinien eine Prüfmethode auf fertigungsgerechte Konstruktion für die generative Fertigung zur Integration in die virtuelle Produktentwicklung vorgestellt. Jene Vorstellung umfasst die Konzeptentwicklung sowie die prototypische Implementierung der Prüfmethode in ein 3D-CAD-System.

**Abstract:** Additive manufacturing technologies currently experience persistent further development. This leads to the comprehensive consideration of those processes from a research perspective. Thus in the present study a short introduction of the concept of Additive Manufacturing is given, the digital process chain is examined and prior work concerning design guidelines for additive manufacturing is presented. Consequently a testing method for additive-manufacturing-ready design based on existing design guidelines for integration into virtual product design is introduced. This includes the conceptual development as well as the prototypical implementation of the testing method into a 3D CAD system.

**Stichwörter:** Generative Fertigungsverfahren, digitale Prozesskette, 3D-CAD-Modellierung, fertigungsgerechte Konstruktion, virtuelle Produktentwicklung.

**Keywords:** Additive Manufacturing, digital process chain, 3D-CAD-modeling, production-oriented design, virtual product design.

## 1 Einleitung

Die technologische Entwicklung, welcher die generativen Fertigungsverfahren unterliegen, ermöglicht neben der Herstellung von einfachen Prototypen ebenfalls das Fertigen von Endprodukten in Form von Kleinserien sowie individualisierten Produkten. Die Besonderheit der generativen Fertigung liegt, je nach Anwendungsfall, in der immensen Zeit- und Kostenersparnis gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren. Dies liegt, neben

dem Herstellen von Bauteilen ohne formgebende Werkzeuge oder materialintensive subtraktive Bearbeitungsverfahren, insbesondere an der Ausprägung der Prozesskette ‚generative Fertigung‘. Reale Modelle können direkt auf Basis von rechnerinternen 3D-CAD-Modellen erzeugt werden. Dieser Fortschritt zieht eine ganzheitliche Betrachtung, Konzeption sowie Implementierung der Prozesskette 3D-CAD zur generativen Fertigung nach sich.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Prozesskette generative Fertigung

Die Prozesskette ‚generative Fertigung‘ umfasst nach [1] acht Prozessschritte. Die Klassifizierung der Prozessabfolge startet ausgehend vom rechnerinternen 3D-CAD-Modell, analog hierzu finden die Methoden des Reverse Engineering Anwendung [2]. Ferner bilden die Bauprozessvorbereitung, die Fertigung des physischen Modells, das darauf folgende Post-Processing und letztendlich die Bauteilanwendung essentielle Bestandteile der Prozesskette, siehe Abbildung 1.

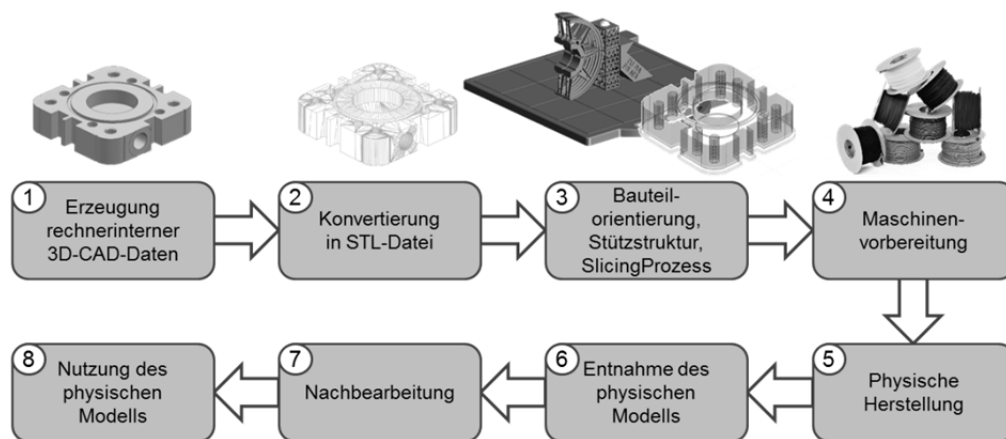


Abbildung 1: Prozesskette generative Fertigung - Beispielprozess nach [1]

Der erste Prozessschritt umfasst die Erstellung eines rechnerinternen 3D-CAD-Modells zur Erzeugung aller notwendigen Geometriedaten, welche zur Fertigung benötigt werden [3]. Hier muss beim Konstrukteur bzw. Entwickler ein erstes Umdenken gegenüber konventionellen Verfahren erfolgen. Denn die Konstruktion von realen Prototypen oder Endprodukten unterliegt Gestaltungsrichtlinien, wie dem fertigungs-, montage- oder recyclinggerechten Konstruieren von Bauteilen [4]. Das Einhalten dieser Richtlinien stellt im

Produktentstehungsprozess einen erfolgsentscheidenden Faktor dar, detailliertere Informationen zu Konstruktionsrichtlinien sollen in Kapitel 2.3 erfolgen. Für die Weiterverarbeitung der erstellten 3D-CAD-Daten findet anschließend die mathematische Methode der Triangulation statt, bei dieser Konvertierung wird das native CAD-Modell mittels Dreiecksfacetten approximiert. Das hier entstehende STL (Surface Triangulation Language) Format, welches einen industriellen De-facto-Standard bildet, wird zum dritten Prozessschritt, der Manipulation selbiger Daten, weitergegeben [5]. Dieser Schritt umfasst die Festlegung der Parameter Baugröße, Positionierung und Orientierung des Bauteils im Bauraum [6]. Darüber hinaus werden je nach Geometrie sowie Orientierung notwendige Stützstrukturen berechnet und generiert. Vor dem Übermitteln der Fertigungsinformationen an die Fertigungsanlage, wird das rechnerinterne Modell in gleich große Schichten, durch das sogenannte Slicen, zerlegt [7]. Für die Erzeugung der physischen Modelle sind ferner weitere Maschinenkonfigurationen erforderlich, beispielsweise die Materialauswahl [1]. Bei der Herstellung finden je nach Verfahrenstechnologie und Anlagentyp differente Verfahrensprinzipien Anwendung, siehe Kapitel 2.2. Die letzten drei Prozessschritte der generativen Fertigung umfassen nach [1] das Entnehmen der Bauteile, eine eventuelle Nachbearbeitung, beispielsweise das Entfernen der Stützkonstruktion sowie das Übergeben der physischen Modelle in die Nutzungsphase.

## **2.2 Generative Fertigungsverfahren**

Zur Herstellung der physischen Bauteile bzw. Modelle kommen unterschiedliche Werkstoffe bei der Fertigung mittels generativen Verfahren zum Einsatz. Zur Herstellung der physischen Bauteile bzw. Modelle mittels generativer Verfahren kommen Kunststoffe, Metalle, Sande, Papiere, Keramiken oder Wachse zum Einsatz [7]. Für den vorliegenden wissenschaftlichen Beitrag soll eine repräsentative Auswahl kurz hinsichtlich ihrer Prinzipien beschrieben werden.

Beim Fused Layer Modeling oder auch Fused Deposition Modeling wird das strangförmige Kunststoffausgangsmaterial zwischen der Schmelz- und Erstarrungstemperatur erhitzt und anschließend fadenförmig auf die Bauplattform oder bereits erzeugte Modellschichten aufgetragen [3]. Mittels dem physikalischen Prinzip der Wärmeleitung werden die einzelnen aufgeschmolzenen und bereits erstarrten Materialschichten verbunden [6].

Die Stereolithographie beruht auf dem Prinzip der Polymerisation, hierbei wird ein Flüssigkeitsbad, Epoxidharze oder Acrylate, durch Energiezugabe mittels Laserstrahl ausgehärtet [1]. Nach Aushärtung jeder Schicht wird die Bauplattform um die vorhandene Schichtstärke abgesenkt um eine neue Schicht zu generieren. Dabei sorgt ein flächiger Auftragsmechanismus dafür, dass eine homogene Ausgangsschicht vorliegt [6].

Als Ausgangsmaterial dienen beim Selective Laser Melting einkomponentige Metallpulver, welche mithilfe eines Laserstrahls vollständig aufgeschmolzen werden [8]. Durch den Abkühlvorgang wird das Material verfestigt, wobei eine poren- und rissfreie Struktur mit einer hohen Materialdichte erzielt wird [5].

Je nach Fertigungsverfahren differieren, die bereits angesprochenen, erforderlichen Konstruktionsrichtlinien hinsichtlich der zum Einsatz kommenden Prozesse, Werkzeuge und fertigungstechnischen Randbedingungen. Im Folgenden werden erste Arbeiten und Möglichkeiten vorgestellt.

## **2.3 Gestaltungsrichtlinien für generative Fertigungsverfahren**

Zur Erfassung der verfahrensspezifischen Restriktionen werden in der Regel heuristische Methoden und Ansätze verwendet. In den letzten Jahrzehnten wurden für konventionelle Fertigungsverfahren, wie Fräsen, Drehen oder Gießen, Gestaltungsrichtlinien in umfassender Form nutzenbringend erarbeitet und den Konstrukteuren zur Verfügung gestellt. Dagegen liegen diese Richtlinien für generative Fertigungsverfahren noch nicht ausreichend oder sogar standardisiert vor. Erste Forschungs- und Umsetzungsarbeiten zu Gestaltungsrichtlinien für generative Fertigungsverfahren werden derzeit am Direct Manufacturing Research Center (DMRC) an der Universität Paderborn [9] oder am Lehrstuhl für Fertigungstechnik der Universität Duisburg-Essen [10] erarbeitet. Mithilfe dieser Arbeiten und Forschungsinitiativen werden erste Ergebnisse für das fertigungsgerechte Gestalten für die Fertigung mittels generativer Verfahren erzielt. Ferner ist es jedoch von großer Bedeutung diese ersten Ergebnisse in Form von Richtlinien und Gestaltungsvorschlägen in die frühe Phase des Produktentstehungsprozesses, der 3D-CAD-Modellierung, zu implementieren. Denn nur hierdurch können die Vorteile, wie Zeit- und Kostenersparnis aufrechterhalten werden.

### **3 Handlungsbedarfe und Anforderungen**

Für die hier vorliegende wissenschaftliche Betrachtung sind insbesondere die rechnerinternen Prozessschritte von primärer Wichtigkeit. Daher beziehen sich die im Folgenden vorgestellten Handlungsbedarfe auf jene Phasen der Prozesskette.

#### **3.1 Handlungsbedarfe aus Sicht der virtuellen Produktentwicklung**

In [11] wurde bereits eine detaillierte Analyse der Prozesskette ‚generative Fertigung‘ durchgeführt und erste Handlungsbedarfe aus Sicht der digitalen Produktentwicklung herausgearbeitet. Diese sollen der Vollständigkeit halber nachstehend aufgezeigt werden.

- Integration von Gestaltungsrichtlinien in die 3D-CAD-Bauteilmodellierung.
- Methodenentwicklung zur Entscheidungsunterstützung für die Auswahl des optimalen generativen Fertigungsverfahrens.
- Überführung vorhandener STL-Datenformat-Alternativen in die industrielle Anwendung.
- Wissenschaftliche Durchdringung und ganzheitliche Betrachtung des Nesting-Prozesses samt aller maschinenspezifischen Restriktionen und Einflussgrößen sowie Integration in die rechnerinternen Prozessschritte.
- Wissenschaftliche Betrachtung von Simulationsmöglichkeiten und Rückführung der Ergebnisse in die frühen Phasen der virtuellen Produktentwicklung. [11]

Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird nachfolgend eine konzeptionelle Möglichkeit zur Integration von Gestaltungsrichtlinien in die 3D-CAD-Bauteilmodellierung vorgestellt.

#### **3.2 Anforderungen an die Integration**

Für eine ganzheitliche Konzeptentwicklung und somit auch einer erfolgreichen prototypischen Implementierung erfordert es einer systematischen Erfassung von Anforderungen. Für eine möglichst vollständige Aufnahme der Anforderungen wurde ein Anwendungsfall sowie das dynamische Verhalten mittels eines Sequenzdiagramms erstellt. Nachstehend sind die primären Forderungen an das zu entwickelnde Konzept beschrieben.

Anf. 1: Entwicklung eines Überprüfungswerkzeuges in einem 3D-CAD-System. Aufbauend auf bereits erarbeiteten Konstruktionsrichtlinien (siehe Kapitel 2.3) sollen am fertigen nativen 3D-CAD-Modell verschiedene Restriktionen automatisiert geprüft werden.

Anf. 2: Kommunikation des Überprüfungswerkzeuges mit dem Benutzer über implementierte programmspezifische Benutzungsoberfläche.

Anf. 3: Zur Erweiterung der hinterlegten maschinenspezifischen Parameter muss eine Eingabe durch den Anwender, beispielsweise Maschinenverantwortlichen, ermöglicht werden, um die abgelegten Daten stetig auf dem aktuellen Stand zu erhalten. Hierdurch wird die Erweiterbarkeit des Werkzeuges gewährleistet.

Anf. 4: Umsetzung von repräsentativen Fertigungsrestriktionen in das Überprüfungswerkzeug. In der frühen Phasen der Entwicklung soll eine stellvertretende Auswahl an Prüfrestrictionen genügen. Wichtig ist eine generische Auslegung des Konzeptes, so dass das Werkzeug mit weiteren Gestaltungsrichtlinien und -parametern adaptiert werden kann.

Anf. 5: Abbildung von Verbesserungsvorschlägen an den Konstrukteur bei nicht erfolgreicher Prüfung auf Fertigungsgerechtigkeit.

Anhand dieser primären Anforderungen an die zu entwickelnde Methode kann ein Konzept erarbeitet werden. Weitere Anforderungen, welche hier der Übersichtlichkeit halber nicht genannt wurden, umfassen Forderungen an Assistenz- bzw. Leitsystem, die Ausprägungen der Gestaltungsrichtlinien (vergleiche Kapitel 2.3) sowie an die Benutzungsoberfläche.

## **4 Konzept**

Ausgehend von der textuellen Beschreibung der Systemanforderungen werden nachstehend Modelle zur Beschreibung des Gesamtsystems ‚Überprüfung auf generative Fertigung‘ samt aller Einzelmodule sowie exemplarisch einzelne Algorithmen zur Überprüfung repräsentativer Fertigungsrestriktionen aufgezeigt.

### **4.1 Gesamtsystembeschreibung**

Das Gesamtsystem besteht aus mehreren Ebenen, welche zum einen den Anwender und das benutzte CAD-System, interne CAD-System-Parts und -Komponenten sowie Maschinen- und Fertigungsparameter enthält. Durch Orchestrierung der einzelnen Systemmodule und Einbeziehung aller Akteure kann der Prüfablauf für das System modelliert

werden, siehe Abbildung 2. Der Algorithmus zum Prüfwerkzeug beginnt mit dem Starten der Methode durch den Anwender. Sind keine Prüfparameter, beispielsweise zur ausgewählten Fertigungsmaschine, vorhanden, so können diese manuell eingetragen werden. Dem Anwender wird angeboten welche Restriktionen er am nativen 3D-CAD-Modell auf Fertigungsgerechtigkeit überprüfen möchte. In der prototypischen Umsetzung stehen hier u. a. das Prüfen auf fertigbare Radien, Zylinder und Bohrungen, minimalen Bauteilstärken sowie das Einhalten vom maximalen Bauraum zur Verfügung. Ist die Auswahl getroffen wird die eigentliche Überprüfung des Bauteils gestartet. Der erste Schritt des Prüfalgorithmus umfasst das Abfragen der relevanten Bauteilparameter. Wird bei der Auswahl der Restriktionen beispielsweise die Überprüfung auf Fertigbarkeit aller Zylinder gewählt, so werden die Bauteilparameter Durchmesser und die Achsenorientierungen sowie Translationsrichtungen erfasst. Jene Parameter werden anschließend mit den hinterlegten Restriktionsparameter verglichen und Entscheidungen über die Fertigbarkeit getroffen. Treten bei dieser Prüfung Fehler auf, werden diese temporär gespeichert und am Ende der Prüfung, wenn alle Restriktionen abgefragt sind, dem Anwender ausgegeben und am 3D-CAD-Modell visualisiert. Das Beispiel der Bohrungsüberprüfung soll im nachfolgenden Kapitel stellvertretend etwas detaillierter dargestellt werden.

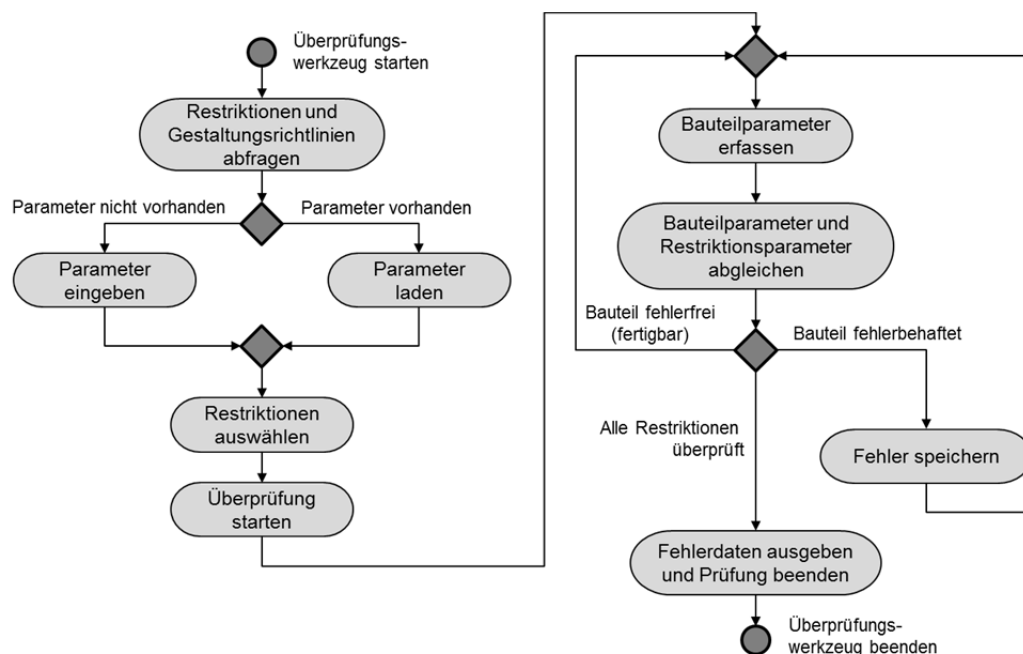


Abbildung 2: Ablauf der Überprüfung auf generative Fertigung

## 4.2 Systemmodulbeschreibung

Wie bereits in der Gesamtsystembeschreibung dargelegt besteht das Gesamtsystem aus mehreren Modulen. Vom besonderen Interesse sind hier die einzelnen Prüfalgorithmen im 3D-CAD-System der einzelnen Fertigungsrestriktionen. Repräsentativ wird nachfolgend das Prüfmodul bzw. der Testalgorithmus für Bohrungen auf deren Fertigbarkeit mittels generativen Fertigungsverfahren beschrieben. Die Fertigungsrestriktion für Bohrungen unterliegt, da es sich um runde Geometrien handelt, dem auftretenden Stufenefekt. Dies bedeutet, dass diverse maschinen- und fertigungsspezifische Limitationen hinsichtlich der Form- und Maßtreue vorliegen. Die konzeptionierte Prüfmethode basiert bei der automatisierten Erkennung von Bohrungen in einem Bauteil auf der Modellierungshistorie und dem Analysieren des Strukturbaums von 3D-CAD-Modellen. Differenziert wird zwischen einer Bohrung und einem Zylinder mithilfe der Erkennung welcher mengentheoretische Operator bei der Erzeugung verwendet wurde. Bei Zylindern findet eine Vereinigung der Translation statt und bei einer Bohrung eine Subtraktion. Wie diese Prüfabfolgen in der Prüfmethode hinterlegt sind zeigt Abbildung 3 vereinfacht. Hier werden im zu prüfenden Bauteil bzw. 3D-CAD-Modell alle Elemente erfasst, welche die jeweilige spezifische Geometrie im Modell hervorrufen können. Über verschiedene Schleifen und implementierte Entscheidungen werden die Modelle algorithmenbasiert abgefragt und hierdurch die Ergebnisse der Prüfmethode ermittelt.

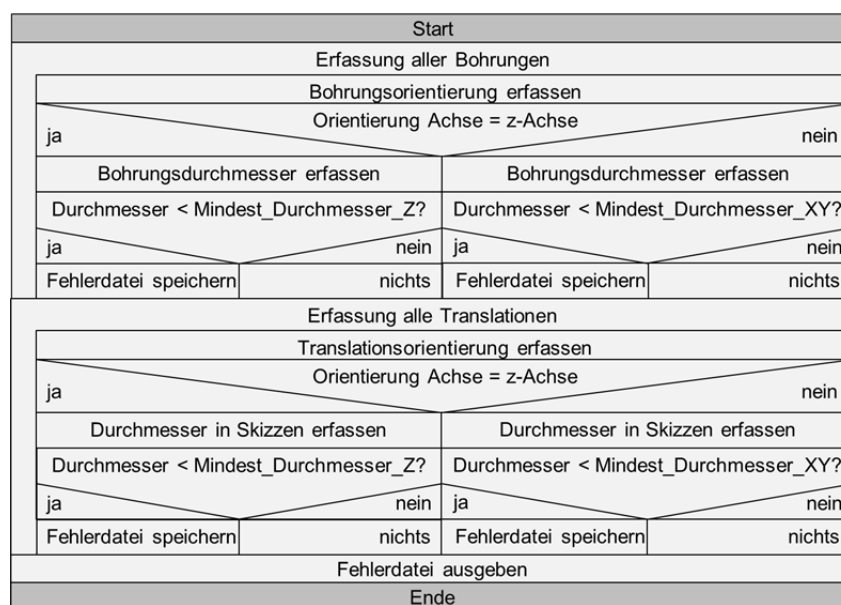


Abbildung 3: Prüfalgorithmus zum Prüfmodul 'Fertigungsgerechte Bohrungen'



## 5 Prototypische Implementierung

Das entwickelte Konzept soll abschließend in Form einer prototypischen Implementierung in einem 3D-CAD-System erprobt werden. Als 3D-CAD-System wurde sich für Siemens NX entschieden, da dieses am Fachgebiet DiK in der Lehre als auch in Forschungsarbeiten Anwendung findet. Abbildung 4 zeigt den Ablauf der Methode am Beispiel der Überprüfung der Einhaltung von Schichtvielfachen. Das gezeigte Beispiel basiert auf dem Erfassen und Analysieren der Abstände zwischen parallel zur Fertigungsebene liegende Bauteilflächen. Wird ein Abstand berechnet der nicht einem Schichtvielfachen entspricht findet ein visueller Hinweis der betroffenen Fläche sowie eine textuelle Meldung an den Anwender statt, damit dieser den Fehler beheben oder ihn in die generative Fertigung des Bauteils einplanen kann.

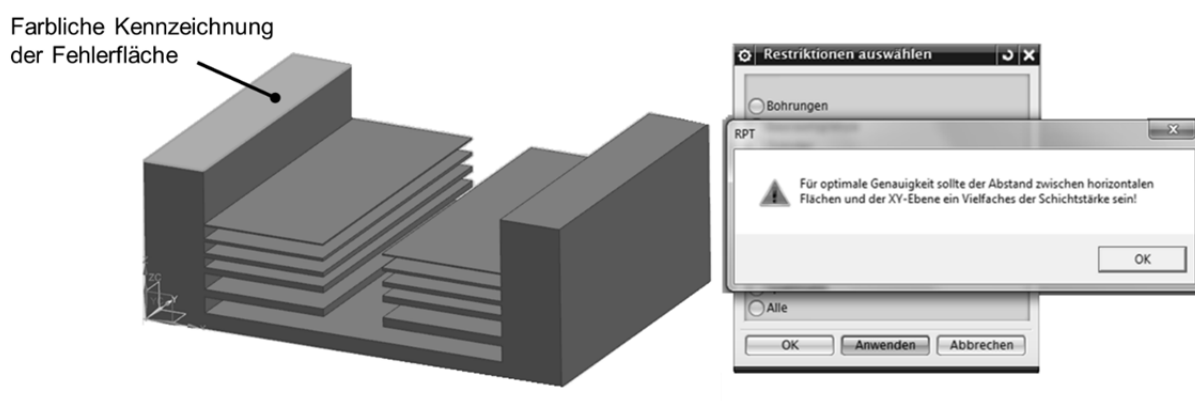


Abbildung 4: Prototypisch implementierter Prüfablauf am Beispiel ‚Schichtvielfache‘

## 6 Ausblick und Zusammenfassung

Die Implementierung und Nutzung eines Überprüfungswerkzeuges für fertigungsrechte Konstruktion in der virtuellen Produktentwicklung setzt Kenntnisse über Maschinen- und Fertigungsparameter voraus. Dies bedeutet, dass es einer ganzheitlichen und stetigen Erschließung jener Bedarf. Darüber hinaus erfordert es einer standardisierten und systemneutralen Auslegung der Prüfmethode, um alle gängigen und in der Industrie verwendeten 3D-CAD-Systeme zu bedienen. Außerdem müssen die konzeptionierten Prüfmodule für komplexe Geometrien betrachtet und erweitert werden. Nur so können die anfangs besprochenen Vorteile der generativen Fertigung durchgängig aufrechterhalten werden.

Der vorliegende wissenschaftliche Beitrag hat die Prozesskette der generativen Fertigung aus Sicht der virtuellen Produktentwicklung beleuchtet, Handlungsbedarfe dargelegt sowie erste Schritte zur Unterstützung der 3D-CAD-Modellierung aufgezeigt. Es wurden Prüfalgorithmen für eine repräsentative Auswahl von Fertigungsrestriktionen konzeptuiert und prototypisch im 3D-CAD-System implementiert. Eine aufbauende Verifikation und Validierung hat den Nutzen und die damit verbundene Notwendigkeit solch einer Prüfung bestätigt und bestärkt die Weiterverfolgung der gezeigten Lösungsansätze.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Gibson, I.; Rosen, David W.; Stucker, B.: *Additive manufacturing technologies. Rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York, NY: Springer, 2010. - ISBN 978-1-4419-1120-9
- [2] Raja, V.; Fernandes, K.: *Reverse Engineering - An Industrial Perspective*. London: Springer, 2008. - ISBN 978-1-84628-855-5
- [3] Zäh, M.; Hagemann, F.: *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren*. München: Hanser, 2006. - ISBN 978-3-446-43916-0
- [4] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung*. 8. Aufl. Berlin: Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-29569-0
- [5] Fastermann, P. : *3D-Druck/Rapid Prototyping. Eine Zukunftstechnologie - Kompakt Erklärt*. New York: Springer, 2012. - ISBN 978-3-642-29225-5
- [6] Gebhardt, A.: *Generative Fertigungsverfahren. Rapid prototyping - rapid tooling - rapid manufacturing*. 3. Aufl. München: Hanser, 2007. - ISBN 978-3-446-22666-1
- [7] Steinhilper, R.; Rieg, F.: *Handbuch Konstruktion*. Stuttgart: Hanser, 2013. - ISBN 978-3-446-43000-6
- [8] Kief, H. B.; Roschiwal, H. A.: *CNC-Handbuch 2013/14*. München: Hanser, 2013. - ISBN 978-3-446-43537-7
- [9] Zimmer, D.; Adam, G.O.: *Konstruktionsregeln für Additive Fertigungsverfahren*. Zeitschrift Konstruktion, Springer-VDI-Verlag, Ausgabe 7/8-2013, 2013.
- [10] Wegner, A.; Witt Gerd: *Konstruktionsregeln für das Laser-Sintern*. Universität Duisburg-Essen. Duisburg, 2012.
- [11] Arndt, A.; Anderl, R.: *Generative Fertigung – Handlungsbedarfe und entscheidungsgestützte Prüfung auf RPT-gerechte Konstruktion*. In: Stelzer, R. (Hrsg.): Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik. EEE2014, Dresden, 2014.

## Nichtlineares Spaltprofilieren von Blechprofilen im rechnerunterstützten Produktentwicklungsprozess

Katharina Albrecht, Thiago Weber Martins, Reiner Anderl

Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion, Technische Universität Darmstadt

Otto-Berndt-Str. 2, 64287 Darmstadt

E-Mail: {albrecht, weber, anderl}@dik.tu-darmstadt.de; Internet: <http://www.dik.tu-darmstadt.de>

**Inhalt:** Seit 2005 besteht der Sonderforschungsbereich 666, um neuartige Methoden zur Fertigung integraler Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung zu entwickeln. Beim linearen Spaltprofilieren wird die Kante eines Blechbandes so umgeformt, dass ein Y-Profil entsteht. In der ersten Förderperiode lag der Forschungsschwerpunkt auf der Entwicklung, Fertigung und Bewertung dieser Blechprofile. Die zweite Förderperiode war durch die Entwicklung von flächigen Bauteilen mit Verzweigungen – dem Spaltbiegen gekennzeichnet. In der aktuellen dritten Förderperiode werden die schon bestehenden Methoden um das nichtlineare Spaltprofilieren erweitert. In diesem Beitrag wird das nichtlineare Spaltprofilieren in das bestehende Informationsmodell aufgenommen und dieses angepasst. Zusätzlich wird ein Ansatz zur Überführung des beschriebenen Informationsmodells in eine Modellierungsfunktion basierend auf der Feature-Technologie von 3D-CAD-Systemen vorgestellt.

**Abstract:** The Collaborative Research Center 666 is researching the technology of new methods to manufacture integral sheet metal design with higher order bifurcations since 2005. The method of linear flow splitting enables the cleaving of sheet metal strips by plastic deformation to a y-profile. The first funding period discussed development, manufacturing and evaluation of sheet metal profiles, while the second funding period focused on extensive sheet metal with bifurcation. The third funding period now focusses on nonlinear flow splitting based on the previously obtained results. This article describes the adaption of the information model to nonlinear flow splitting. In addition, an approach for the transfer of the described information model in a modelling function based on the feature technology of 3D-CAD-Systems is presented.

**Stichwörter:** nichtlineares Spaltprofilieren, Informationsmodell, 3D-CAD

**Keywords:** nonlinear flow splitting, information model, 3D-CAD

### 1 Einleitung

Der seit 2005 bestehende Sonderforschungsbereich 666 beschäftigt sich mit Methoden und Technologien zur Entwicklung und Fertigung von profilartigen verzweigten Blechstrukturen. In der ersten und zweiten Förderperiode wurden die zwei neuartigen Fertigungsverfahren lineares Spaltprofilieren und lineares Spaltbiegen untersucht. In Entwicklung, Fertigung und Bewertung wurden die Fertigungsverfahren hinreichend diskutiert. Das

ultrafeinkörnige (UFG) Gefüge, welches im Umformbereich entsteht und durch eine besondere Härte ausgezeichnet ist, erlaubt eine große Anzahl von denkbaren Anwendungen für die Profile. Zum 4. Zwischenkolloquium 2012 des SFB 666 wurde eine spaltprofilierter Linearführung hergestellt. Dabei werden die positiven Eigenschaften des UFG Gefüges im Profil genutzt und die Flansche als Lauffläche verwendet [1]. In der dritten Förderperiode liegt nunmehr der Fokus auf dem nichtlinearen Spaltprofilieren. Der Querschnitt der Bleche ist variabel. Dies führt zu neuen Einsatzmöglichkeiten im Leichtbau oder in der Automobilindustrie. In diesem Beitrag wird das bestehende Informationsmodell um das nichtlineare Spaltprofilieren erweitert, um weiterhin den Produktentstehungsprozess unterstützen zu können. Basierend auf dem Informationsmodell können mit Hilfe der Feature-basierten Modellierung berechnete und reale Geometrien visualisiert werden [2].

## 2 Produktentstehung nichtlinearer verzweigter Blechprofile

Basierend auf den Erfahrungen im Sonderforschungsbereich der letzten Jahre konnte mit Beginn der dritten Forschungsperiode eine neue Methode zum Spaltprofilieren von Blechbauteilen angewandt werden. Während seit 2005 das innovative Fertigungsverfahren des Spaltprofilierens- und Spaltbiegens (siehe Abbildung 1) nur für lineare Profile und flächige verzweigte Bauteile untersucht wurde, liegt nun der Schwerpunkt auf nichtlinearen Bauteilen. Nähere Informationen zu den bisherigen Ergebnissen finden sich in den Tagungsbänden des Sonderforschungsbereiches [3], [4], [5], [6].

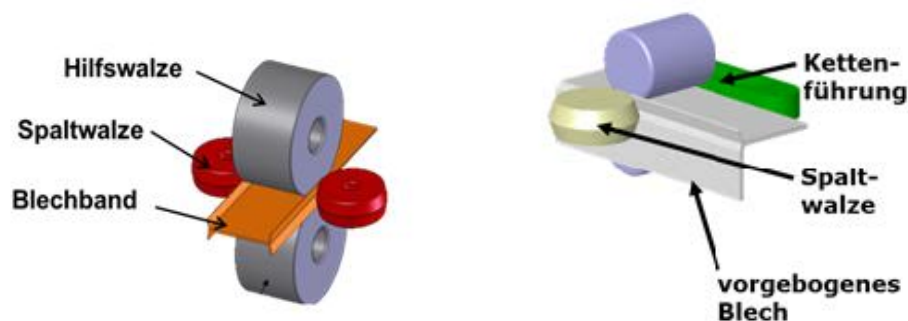


Abbildung 1: links: lineares Spaltprofilieren, rechts: lineares Spaltbiegen [2]

Bei dem Verfahren des linearen Spaltprofilierens wird das Blech von zwei Hilfswalzen in Position gehalten. Von beiden Seiten spalten die Spaltwalzen in mehreren Schritten die Flansche in das Blech. Je nach gewünschter Flanschgröße können bis zu 10 Stufen nacheinander geschaltet sein. Das nichtlineare Spaltprofilieren wird realisiert, indem zwei

voneinander unabhängige Motoren die Spaltwalze positionieren. So können beliebige Blechkonturen gespalten werden [7]. In den ersten zwei Förderperioden haben sich die Blechprofile vom einfachen linear gespalteten Profil bis hin zum flächigen spaltgebogenen Bauteil mit Stegen entwickelt. Ziel der dritten Förderperiode ist die Herstellung von Profilen und flächigen Bauteilen mit flexiblen Konturen. Es ist daher ersichtlich, dass sich die Profile in ihrer Komplexität in den letzten Jahren weiter entwickelt haben. Neue Halbzeug-Geometrien werden möglich und zusätzliche Anforderungen an die Herstellung kommen hinzu. Doch nicht nur die Parameter in der Fertigung sind durch das neue Verfahren gestiegen. Mit ihnen steigen die Anforderungen in der Optimierung und der rechnerunterstützten Produktentstehung. Eine Integration aller Prozesse in die frühen Phasen wird immer essentieller. Der erste Ansatz ist die Anpassung des Informationsmodells sowie die Umsetzung der Inhalte in 3D CAD.

### 3 Erweiterung des Informationsmodells für nichtlineare Spaltprofile

Um den Produktentstehungsprozess weiterhin integriert zu unterstützen, ist es nötig das bestehende Informationsmodell bezüglich der Nichtlinearitäten der verschiedenen Spaltprofile zu erweitern. Das Informationsmodell selbst besteht aus verschiedenen Partialmodellen, welche mit dem Kernmodell verbunden sind [8]. Basierend auf dem weiterentwickelten Kernmodell *SolutionGraph* [9] werden über die neue Klasse *SplineEdge* Informationen zur Darstellung nichtlinearer Spaltprofile hinzugefügt.

#### 3.1 Darstellung nichtlinearer Spaltprofile

Basierend auf vorhergehender Forschung werden spaltprofilierte und spaltgebogene Blechprofile als Graphenstrukturen dargestellt. Spaltprofile werden als *SolutionTree* bezeichnet und als Binärbaum dargestellt. Die flächigen Bauteile aus der zweiten Phase werden durch Zusammensetzung von *SolutionTree* und eines *SurfaceGraphes* dargestellt. Das aktuelle Kernmodell wird als *SolutionGraph* bezeichnet. Das Spaltprofil wird als Spannbaum oder Binärbaum dargestellt. Bisher wurde angenommen, dass es keine Änderung in Längsrichtung des Profils gibt [8]. Der *SurfaceGraph* stellt das flächige Bauteil dar, auf dem linear spaltgebogen wird. *SurfaceGraph* ist eine Freiformfläche [2]. In Abbildung 2 a) wird ein beispielhafter *SolutionTree* dargestellt. Er besteht aus Knoten und Kanten. Knoten werden im Kernmodell *SolutionNodeProfile* genannt, welche entweder root-, leaf-

oder ProzessFeatureKnoten sind. Kanten verbinden die Knoten miteinander und beinhalten Informationen wie Länge oder Dicke der Kante. Mit den Klassen *SolutionTree* und *SurfaceGraph* können profilartige und flächige Bauteile vollständig dargestellt werden [9]. Im Kernmodell wird bisher keine Aussage getroffen, wie und ob sich die einzelnen Spaltprofile in Längsrichtung verändern. Um Nichtlinearität abbilden zu können, muss das Kernmodell so erweitert werden, dass Informationen über die Längsrichtung des Profils ausgelesen werden können. In Abbildung 2 b) ist verwendete Ansatz schematisch dargestellt.

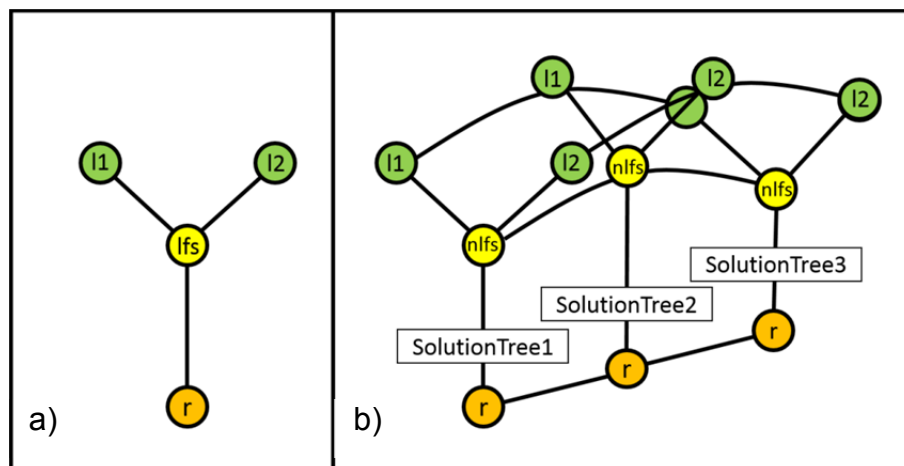


Abbildung 2: a) SolutionTree, b) SolutionTree mit Informationen in Längsrichtung

Entlang eines Splines werden mehrere *SolutionTrees* miteinander verbunden. Die *SolutionTrees* bleiben topologisch konstant, während sich die Geometrie in Abhängigkeit des Splines ändert. Dadurch können verschiedene Profilverläufe, ob linear oder nichtlinear, dargestellt werden. Eine wichtige Randbedingung lautet: Nichtlineare Splines dürfen nur Knoten miteinander verbinden, deren Attribut *isCrossVertex* = *true* ist. Dies sind Technologieknoten, also Knoten an denen ein Prozess durchgeführt wird. Denn nur dann kann das *ProzessFeature* des Knotens das nichtlineare Spaltprofilieren oder das nichtlineare Spaltbiegen sein. Vorgänger-knoten sind unabhängig Technologieknoten, während alle Nachfolger-knoten in Abhängigkeit zum Technologieknoten dargestellt werden. Das heißt, dass alle Nachfolger-knoten des Technologieknotens ihre Eigenschaften gegenüber dem Technologieknoten behalten und mit sich ihm zusammen im Raum bewegen. Werden mehrere Spaltprozesse nacheinander ausgeführt, muss zunächst ermittelt werden in welcher Reihenfolge dies geschieht. Das Vorgehen bleibt jedoch gleich.

### 3.2 Erweiterung des Kernmodells

Um das Vorgehen aus 3.1 umzusetzen, wird die Klasse *SplineEdge* in das Kernmodell integriert (siehe Abbildung 3). *SplineEdge* wird als Unterklasse der schon verwendeten Klasse *CoreEdge* definiert. *CoreEdge* verbindet die einzelnen Technologieknoten (*SolutionNodeProfile*) innerhalb eines *SolutionTrees* miteinander. *SplineEdge* wird nun für die Kopplung mehrerer Profile in Längsrichtung verwendet. *SplineEdge* besitzt insbesondere das Attribut *isnonlinear* = *boolean*. Ist dieses Attribut wahr, bedeutet es, dass nichtlineare Profile dargestellt werden. So greift die *SplineEdge* auf den passenden *SolutionNodeProfile* zu, welcher beispielsweise das Attribut *typeMProcessFeature* = *NonlinearFlowsplitting* besitzt.

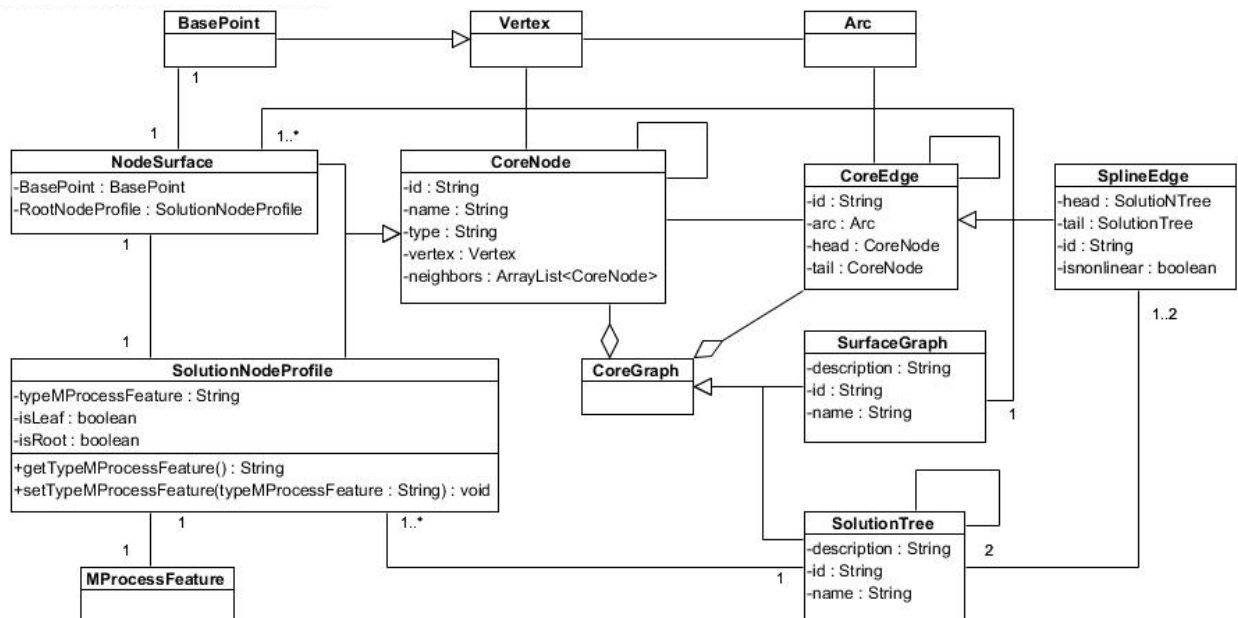


Abbildung 3: Kernmodell zur Abbildung des SolutionGraphs für nichtlinear gespaltene Bleche

Durch die Aneinanderreihung von *SolutionTrees* entlang eines oder mehrerer *SplineEdges* entsteht ein beliebiges lineares oder nichtlineares Bauteil. Ein *SolutionTree* hat entweder null oder einen *SolutionTree* als Vorgänger und entweder null oder einen *SolutionTree* als Nachfolger. Es existieren verschiedene Nebenbedingungen. Wenn das Attribut eines Knotens *isCrossVertex* = *true* ist und das Attribut von *SplineEdge* *isnonlinear* = *true* dann kann ein nichtlineares Bauteil dargestellt werden. Ist *isnonlinear* = *false* werden die *SolutionTrees* über Geraden miteinander verknüpft und es kann ein lineares Spaltprofil dargestellt werden. Eine Nichtlinearität kann nur auftreten, wenn entweder das Feature

*nonlinearFlowSplitting* oder das Feature *nonLinearBendSplitting* verwendet wird und in *SplineEdge* eine nichtlineare Kurve definiert ist. Für den Fall des nichtlinearen Spaltbiegens, liegt die *SplineEdge* auf der Freiformfläche. Im Idealfall wird der Spline über Punkte in der Fläche direkt definiert. Durch die Anpassung des Informationsmodells ist es nun mögliche Modellierungsfunktionen für 3D-CAD Modelle basierend auf Feature-Technologien zu entwickeln.

#### **4 Modellierungsfunktion basierend auf Feature Technologien**

Heutzutage werden rechnerunterstützte Werkzeuge (*CAX- Computer Aided*) zunehmend in den Produktentwicklungsprozess eingebunden. Dabei werden die Entwicklungszeit verkürzt und die Entwicklungskosten reduziert. 3D-CAD-Systeme spielen dabei eine zentrale Rolle in der CAX-Prozesskette, denn diese ermöglichen als Volumenmodelle modellierte Produkte als Basis für nachgelagerte Prozesse darzustellen, deren Festigkeitsberechnung mithilfe CAD-FEM (Finite-Elemente-Methode), Kollisionsprüfung mithilfe CAD-MKS (Mehrkörpersimulation) oder Ableitung von NC-Steuerbefehle mithilfe CAD-CAM durchzuführen. Moderne 3D-CAD Systeme verfügen über die Feature Technologie. Im Kontext der geometrischen Modellierung wird ein Feature als geometrisches Element definiert, welches auf eine technische Anwendung bezogen und durch geometrische und nicht-geometrischen Produkteigenschaften beschrieben wird. Diese werden durch Parameter, mathematische Regeln und Zusammenhänge, semantische Informationen und/oder Zwangsbedingungen (Constraints) dargestellt. Darauf basierend können Produktmodelle in 3D-CAD Systemen durch mehrere Features erstellt, gespeichert, geändert und gelöscht werden [2], [10].

Mithilfe des featurebasierten Modellierungsansatzes können fertigungsrelevante Informationen in 3D-CAD Modelle eingebunden werden, welche erlauben Fertigungsprozesse abzubilden. Allerdings existieren keine Features in den heutigen 3D-CAD Systemen, die die Modellierung der, mit den innovativen Fertigungsverfahren Spaltprofilieren und Spaltbiegen gefertigten, verzweigten Blechbauteile unterstützen [2].

Im Rahmen des SFB 666 werden nach Ansätzen zur algorithmisierten und direkten Modellierung von verzweigten Blechbauteilen in 3D-CAD Modellen geforscht. Die Ansätze der algorithmisierten Modellierung basieren auf die Methoden der algorithmisierten Produktentwicklung, wonach die Produktgeometrie der verzweigten Blechbauteile automa-



tisch aus einem mathematischen Lösungsbaum abgeleitet wird. Die Methoden der direkten Modellierung beruhen auf den in CAD-Systemen bereits existierenden Funktionen und Umgebungen zur Konstruktion des gewünschten Bauteils.

Beide Ansätze wurden in der ersten und zweiten Phase des SFB 666 verfolgt. Features für lineare verzweigte Blechprofile wurden in [11], [12], [13] entwickelt. Die Entwicklung von Features für flächige Bauteile mit linearen Profilverläufen wurden in [9], [14],[15] aufgezeigt.

Durch die Erweiterung des Produktspektrums von linearen zu nichtlinearen verzweigten Blechbauteilen, welches dem Fokus der dritten Phase des SFB 666 entspricht, müssen neuen wissenschaftliche Ansätze zur Entwicklung von Modellierungsfunktionen für solche Produkte untersucht werden. Dabei sollen die in der früheren Phasen bereits entwickelten Modellierungsfunktionen erweitert werden, sodass nichtlineare parametrisierte Verzweigungsstrukturen mithilfe Features in heutigen 3D-CAD Systemen abgebildet werden können.

#### 4.1 Einbindung des Informationsmodell in das Featuremodell

Basierend auf dem in diesem Beitrag vorgestellten Informationsmodell, soll ein Ansatz für Modellierungsfunktionen auf Basis der Feature Technologie für nichtlineare verzweigte Blechbauteile vorgestellt werden. Dieser soll die in der ersten Phase des SFB 666 entwickelten Features von linear auf nichtlinear erweitern.

Die Herausforderung besteht darin, geeignete Modellierungsstrategien und mathematischen Beschreibungsformen zu wählen, welchen die nichtlinearen Verläufe des verzweigten Blechprofils so exakt wie möglich abbilden. Letzteres stellt eine Anforderung an die zu entwickelnden Features dar, da das 3D-CAD Modell von nichtlinearen verzweigten Blechprofilen als Kern für die integrierte Produktentwicklung gilt. Dementsprechend soll aus dem 3D-CAD-Modell Fertigungsschritte und –folgen abgeleitet werden können.

Beliebige nichtlineare Verläufe können in Bezug auf parametrische Beschreibungsformen von geometrischen Elementen als Freiformkurven betrachtet werden. Diese wurde durch die Einführung der Klasse *SplineEdge* in das Informationsmodell berücksichtigt. Aufbauend auf dieser Klasse können die notwendigen Parameter (z.B. Stützpunkte, Grad und Gewichtung der einzelnen Punkte) abgerufen werden. Somit können die nichtlinearen Verläufe mithilfe B-Splines oder NURBS in CAD-Systemen modelliert werden. Der Vorteil

eines solchen Vorgehens besteht darin, dass NURBS bereits in CAD Systemen etabliert sind um Freiformkurven darzustellen. Allerdings können Freiformkurven dabei mithilfe Stützpunkten nur approximiert werden. Das heißt, um die notwendige Exaktheit des CAD Modells von nichtlinearen verzweigten Blechprofile zu erreichen, müssen eine Mindestanzahl von Stützpunkten abhängig der Komplexität der Freiformkurve vorausgesetzt werden.

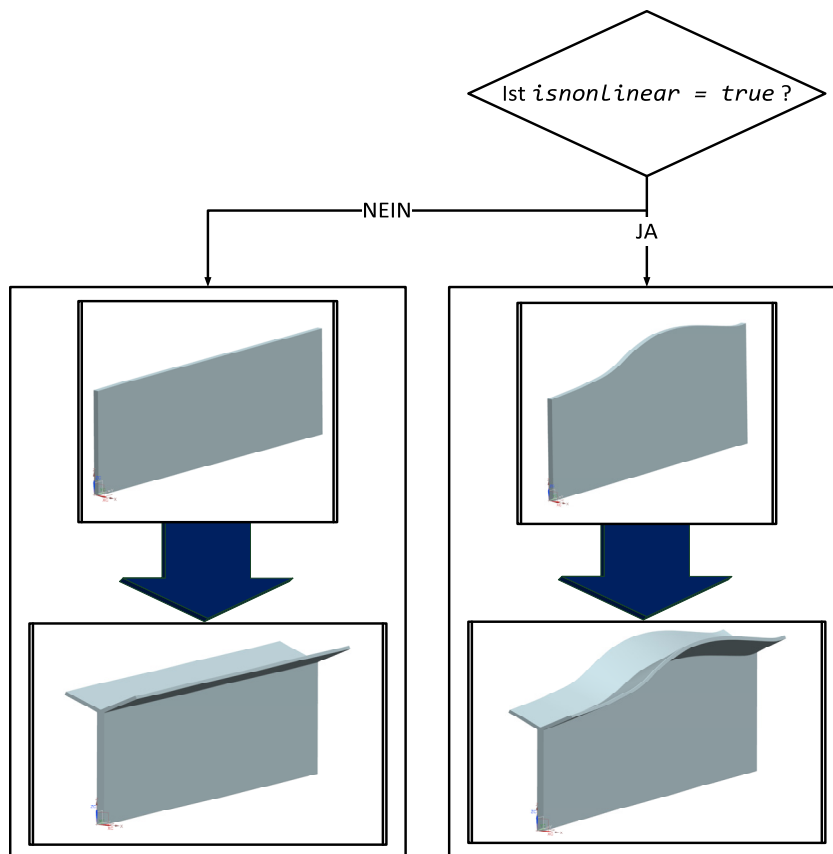


Abbildung 4: Feature zur Darstellung von nicht-linearen verzweigten Blechbauteile.

In der Abbildung 4 ist die Funktionsweise der Kopplung zwischen dem Informationsmodell und dem Featuremodell dargestellt. Dabei greift das Feature im CAD-System auf das Informationsmodell zu, um das Attribut *isnonlinear* der Klasse *SplineEdge* zu erhalten. Abhängig von dem gespeicherten Wert, erstellt das CAD-System entweder ein linear (Abbildung 4 links) oder ein nichtlinear verzweigtes Y-Profil (Abbildung 4 rechts). Somit wurde gezeigt, dass das in diesem Beitrag vorgestellte Informationsmodell und Featuremodell den algorithmisierten Modellierungsansatz des SFB 666 unterstützen.

## 5 Ausblick

Einhergehend mit der Anpassung des Kernmodells müssen die weiteren Partialmodelle des Informationsmodells um das nichtlineare Spaltprofilieren erweitert werden. Die wichtigsten Partialmodelle in diesem Zusammenhang sind das *Ressource*-, das *Technology*- und *Featuremodel*. Weiterhin muss untersucht werden, ob das Fertigungsverfahren weitere Einflüsse auf andere Partialmodelle hat. Diese müssen daraufhin ebenfalls erweitert und aktualisiert werden um die ganzheitliche Prozessunterstützung zu gewährleisten.

Ansätze von Modellierungsfunktionen basieren auf Feature Technologien zur Abbildung nichtlinearem Spaltbiegen und Spaltprofilieren von flächigen Blechbauteilen sollen in zukünftigen Arbeiten entwickelt werden. Folgend sollen in Zukunft die entwickelten Featuremodelle mithilfe der API NX Open in Siemens NX implementiert werden.

## 6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde gezeigt, wie das neuartige Fertigungsverfahren nichtlineares Spaltprofilieren computerunterstützt dargestellt werden kann auf Basis eines Prozess unterstützenden Informationsmodells. Durch die Erweiterung des Kernmodells ist es nun möglich Informationen in Längsrichtung abzubilden. Mit dieser Voraussetzung können Feature Technologien zur Darstellung des nichtlinearen Spaltprofilierens entwickelt und verwendet werden. Dazu wurde ein Ansatz eines Featuremodells zur Modellierung des nichtlinearen verzweigten Spaltprofils entwickelt, um das in diesem Beitrag vorgestellte Informationsmodell anzuwenden.

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung der Teilprojekte A4 und A5 des Sonderforschungsbereiches SFB 666.

## Literatur

- [1] Karin, Ivan; Hößbacher, Johannes; Lommatzsch, Nils; el Dsoki, Chalid; Birkhofer, Herbert; Hanselka, Holger: *Spaltprofilierte Linearführung auf dem Prüfstand*. In: Tagungsband 3. Zwischenkolloquium SFB 666. Bamberg: Meisenbach Verlag GmbH, 2010. pp. 111-116. ISBN 978-3-87525-301-6

- [2] Weitzmann, Oliver; Schüle, Anselm; Anderl, Reiner: *Featurebasierte Modellierung flächiger Blechbauteile mit Verzweigungen*. In: 9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. Aachen: Shaker, 2011. pp. 98-105. ISBN 978-3-844-00381-9
- [3] Tagungsband 1. Zwischenkolloquium SFB 666. Bamberg: Meisenbach Verlag GmbH, 2007
- [4] Tagungsband 2. Zwischenkolloquium SFB 666. Bamberg: Meisenbach Verlag GmbH, 2008
- [5] Tagungsband 3. Zwischenkolloquium SFB 666. Bamberg: Meisenbach Verlag GmbH, 2010
- [6] Tagungsband 4. Zwischenkolloquium SFB 666. Bamberg: Meisenbach Verlag GmbH, 2012
- [7] Schmitt, Wolfram; Groche, Peter: *Herstellung verzweigter Bleche flexiblen Querschnitts*. In: 4. Zwischenkolloquium SFB 666. Bamberg: Meisenbach Verlag GmbH, 2012. pp. 51-58. ISBN 978-3-87525-332-0
- [8] Anderl, Reiner; Wu, Zhenyu; Rollmann, Thomas: *Information modeling and representation of sheet metal parts with higher order bifurcations*. In *Proceedings of the 9. International Conference on Technology of Plasticity*. Gyeongju, Korea, 2008
- [9] Weitzmann, Oliver J.; Schüle, Anselm L.; Rollmann, Thomas H.; Anderl, Reiner; Göllner, Thea: *An object-oriented information model for the representation of free form sheet metal parts in integral style*. In: *Tools and Methods of Competitive Engineering*. Karlsruhe, 2012. - ISBN 978-90-5155-082-5
- [10] VDI-Richtlinie 2218: *Feature Technologie*, Düsseldorf 2003
- [11] Anderl, Reiner; Rollmann, Thomas; Wu, Zenyu; Chahadi, Youssef: *Algorithm-Based Product Development – Refined Concept And Example Applications*. In *Proceedings of the ASME DETC*. USA, 2008
- [12] Rollmann, Thomas; Schüle, Anselm; Anderl, Reiner; Chahadi, Youssef: *Three-Dimensional Kernel Development with parasolid for integral sheet metal design with higher order bifurcations*. In *Proceedings of ASME DETC*. USA, 2009
- [13] Schüle, Anselm L.; Rollmann, Thomas; Anderl, Reiner: *Realization of Design Features for Linear Flow Splitting in NX6*. In *Proceedings of ICIMAE*. 2009
- [14] Schüle, Anselm; Weitzmann, Oliver; Anderl, Reiner: *Feature-based modeling of bifurcated sheet metal products*. In *Proceedings of APIEMS*. 2011
- [15] Rollmann, Tomas H.; Schüle, Anselm; Weitzmann, Oliver; Anderl, Reiner: *Feature Precedence Graphs as an Approach for the forming operations planning of integral sheet metal parts*. In *Proceedings of ISAM*. 2011

## 3D-Tumor-Referenzmodelle für die Evaluierung von Kontierungsalgorithmen für das PET/CT Bildgebungsverfahren

Ingo Jonuschies<sup>1</sup>, Klaus Brökel<sup>1</sup>, Jens Kurth<sup>2</sup>, Bernd J. Krause<sup>2</sup>

Lehrstuhl für Konstruktionslehre / CAD<sup>1</sup>, Universität Rostock

Albert-Einstein-Straße 2, 18059 Rostock

Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin<sup>2</sup>, Universitätsklinikum Rostock

Gertrudenplatz 1, 18057 Rostock

E-Mail: ingo.jonuschies@uni-rostock.de; Internet: <http://www.kt.uni-rostock.de>

**Inhalt:** Das Verfahren der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) wird in der Nuklearmedizin für die Lokalisierung von Tumoren verwendet. Für die Charakterisierung und Kalibrierung von PET Bildgebungssystemen werden üblicherweise Phantome bestehend aus Glashohlkugeln, die mit einer radioaktiven Lösung gefüllt sind, benutzt. Diese Art der Phantome ist nicht besonders gut für die Validierung von Kontierungsalgorithmen zur Darstellung von Tumorgeometrien geeignet. Gründe hierfür sind auftretende Randschichteffekte an der Glaswand und die im Körper nicht vorkommende perfekte Kugelgeometrie. Mit der hier vorgestellten Methode können Phantomkörper mit realitätsnahen Tumorgeometrien und ohne Randschichteffekt hergestellt werden. Sie können neben der Validierung zusätzlich zur Optimierung von Kontierungsalgorithmen Verwendung finden. Die realitätsnahen Tumorgeometrien werden durch einen Reverse Engineering Prozesses aus realen CT-Patientendaten gewonnen und mittels eines Rapid Prototyping Verfahrens in Tumorsurrogate umgesetzt.

**Abstract:** The method of positron emission tomography (PET) is commonly used in nuclear medicine for the localization of tumours. Characterization of PET imaging systems is normally done with phantoms consisting of hollow spheres, filled with radioactive solution. These phantoms are not well suited for the evaluation of algorithms used to monitor a tumour response. This is mainly, because the inactive wall leads to quantification errors in the presence of background activity and because in vivo tumour structures deviate from a perfect sphere. A method is developed for the reproducible production of F-18 (radioactive marker) labelled tumour models from alginate, which have no inactive walls and are based on real CT tumour geometries. From CT data sets tumour geometries are segmented and converted into STL-files that describe the surface geometry. Based on these data different reusable negative moulds are manufactured by a rapid prototyping process. With these moulds the final tumour model is made in specially tailored alginate mixed with the desired concentration of F-18.

**Stichwörter:** PET/CT, Rapid Prototyping, Tumorgeometrien, Referenzmodell, Randschichteffekt

**Keywords:** PET/CT, Rapid Prototyping, tumour geometries, reference model, surface layer effect

## 1 Einleitung

In der Nuklearmedizin werden immer neue Verfahren gesucht, Erkrankungen rechtzeitig zu erkennen, um sie schneller behandeln zu können und die Heilungschancen zu erhöhen. Eines dieser Verfahren ist die Positronen-Emissions-Tomographie. Sie wird unter anderem zur Früherkennung, Therapiekontrolle und Stadieneinteilung von Krebserkrankungen genutzt. Hierbei wird dem Patienten ein radioaktiv markierter Tracer F18 verabreicht, welcher metabolisiert wird und sich daraufhin das radioaktive Material im Körper verteilt. Meistens wird Glukose als Tracer verwendet. Da Tumore und Metastasen einen hohen Glukosestoffwechsel besitzen, sind sie mit Hilfe der PET sehr gut herauszufiltern. Sie erfasst die ausgehende Strahlung und macht sie auf einem Bild sichtbar. Heute wird dieses bildgebende Verfahren meist mit der Computertomographie kombiniert, um mit ihr eine eindeutige anatomische Zuordnung des bösartigen Gewebes durchführen zu können. Diese Kombination hat sich in den letzten Jahren sehr gut in der Onkologie etabliert, was auch darauf zurückzuführen ist, dass innerhalb kürzester Zeit der komplette Körper auf Tumore und Metastasen abgesucht werden kann und die Patienten diese Untersuchung sehr gut verkraften [1]. Weiterhin wird die Kombination von Positronen-Emissions-Tomographie und Computertomographie (PET/CT) eingesetzt, um die Behandlung des Krebses durch gezielten Beschuss mit Elektronen besser planen und realisieren zu können. Die relevanten Daten müssen so genau wie möglich sein, um die Grenzen der bestrahlten Bereiche so eng wie nur möglich zu halten. Jedoch besitzt die PET nur eine Ortsauflösung von 5 mm [2]. Somit muss eine genaue Größenbestimmung des bösartigen Gewebes auf anderem Weg erfolgen. Es gibt bereits mathematische Algorithmen zur Größenbestimmung, wobei bisher kein realitätsnahes physisches Vergleichsmodell vorhanden ist, um diese Algorithmen realistisch zu untersuchen. Bisher wurden als Referenzmodelle mit Tracer gefüllte Glashohlkugeln, sogenannte Phantomeinsätze verwendet. Diese sind in keiner Weise praxisnah, da nichts im Körper eine exakt runde Kontur vorweist und durch die Verwendung von Glashohlkugeln ein Randschichteffekt zu beobachtet ist [3]. Der Randschichteffekt begründet sich durch den inhomogenen Materialübergang zwischen dem radioaktiven Marker in der Hohlkugel und der Umgebung. Aufgrund der Glaswand kommt es zu einem Unschärfebereich an den Konturgrenzen, welcher mehrere Millimeter betragen kann. Aus diesem Grund wurde eine Methode entwickelt, Referenzmodelle aus originalen Tumordaten zu generieren, die keinen Randschichteffekt haben. Die Referenz-

modelle dienen zur Kalibrierung der PET/CTs sowie zum Validieren und Optimieren vorhandener Rechenalgorithmen zur Bestimmung der Bestrahlungsbereiche für eine anschließende Strahlentherapie. Im ersten Teil wird die Überführung einer Tumorgeometrie aus gegebenen CT-Daten in ein dreidimensionales CAD-Modell beschrieben. Dieses Modell wird am Ende die Möglichkeit bieten, über ein geeignetes Rapid Prototyping Verfahren gefertigt werden zu können. Im zweiten Teil wird die Herstellung eines physischen Referenzmodells (Tumorsurrogat) und die Auswahl geeigneter Modellmaterialien beschrieben.

## 2 Vom DICOM Format zum 3D-Modell

Im folgenden Kapitel werden die Werkzeuge und Methoden beschrieben, welche zur Extraktion eines Tumors (Läsion) aus den Daten einer PET/CT-Untersuchung herangezogen wurden. Die Ergebnisse der Computertomographie stehen im DICOM-Format zur Verfügung. Der Tumorbereich muss für sich extrahiert werden, da bei der Bildgebung der komplette Oberkörper untersucht und somit auch in den PET/CT-Ergebnissen vollständig abgebildet ist. Für die Extraktion wurden geeignete Programme zur Untersuchung der DICOM-Dateien verglichen. Mit deren Hilfe wird anschließend der Tumor selektiert und in ein 3D-Modell überführt.



Abbildung 1: PET/CT Aufnahme der Lunge im DICOM-Format

## 2.1 Vergleich DICOM-Viewer

Für die Auswertung der CT-Daten wurden Programme verglichen, die es ermöglichen, das DICOM-Format zu lesen. Es wurden insgesamt 14 Programme verglichen und nach verschiedenen Kriterien bewertet. Die wichtigsten Funktionen, die die Software bereitstellen muss, sind einerseits die Möglichkeit der Selektion des Tumorbereichs aus dem gesamten Datensatz und andererseits die Überführung der selektierten Bereiche in ein für ein CAD-System verwertbares Dateiformat. In diesem Bereich wird sich auf das von den meisten DICOM-Viewern unterstützte STL-Format beschränkt. Ein drittes Kriterium ist die Handhabung des Programms. Dazu gehört, wie intuitiv auf wichtige Befehle zugegriffen werden kann, um ein effizientes Arbeiten zu ermöglichen. Es wurden zudem die Übersichtlichkeit, die allgemeine Darstellung der Daten und die Programmstabilität überprüft. Die Programmstabilität ist insofern wichtig, da ein großes Datenvolumen verarbeitet werden muss. Die Kriterien wurden auf einer Skala von Null bis Fünf bewertet, wobei Fünf die bestmögliche Punktzahl darstellt. Da die Selektion des Tumors und die Überführung der Tumorgeometrie in das STL-Format die beiden wichtigsten Kriterien sind, wurde ihre Wertigkeit verdoppelt. Die Programme wurden bei der Bewertung in zwei Gruppen gegliedert, erste Gruppe Freeware und zweite Gruppe kommerzielle Software. In Abbildung 2 ist der Vergleich dargestellt.

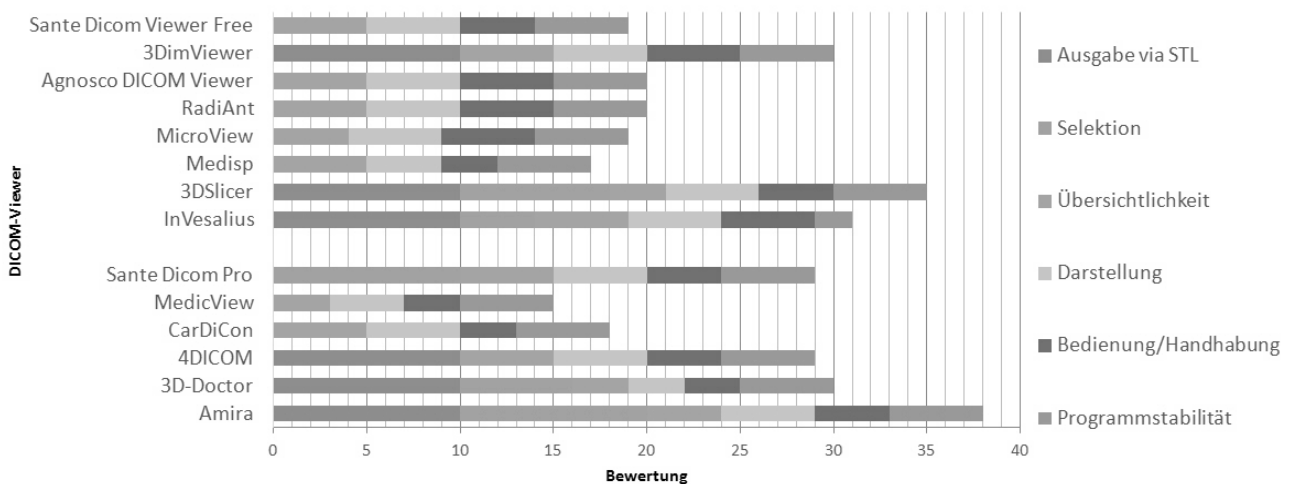


Abbildung 2: Validierung der DICOM-Viewer

Im Bereich der freien Software gab es bei fünf von acht Programmen nicht die Möglichkeit einer Selektion der Tumorbereiche bzw. einer anschließenden Überführung in das STL-Format. Dadurch haben die Programme für die weitere Betrachtung keinen Nutzen.



Das drittplatzierte Programm kann in fünf von sechs Kriterien vollständig überzeugen, jedoch fehlt ein Werkzeug zur Tumorauswahl. Die beiden verbleibenden Programme bieten diese Möglichkeiten. Bei der Software auf dem zweiten Platz ist die Auswahl der Tumorgrenzen sehr umständlich. Es wird der Grenzwert der Hounsfield-Skala eingestellt, woraufhin auf jeder Schicht die entsprechenden Grenzen selektiert werden. Die markierten Bereiche umfassen wiederum mehr als nur das Tumorgewebe. Somit muss alles, was nicht zum Tumor gehört, extra selektiert und entfernt werden. Das nimmt zum einen sehr viel Zeit in Anspruch und hat zum anderen den Nachteil, dass es nicht möglich ist, bei dieser Vorgehensweise ausschließlich das Karzinom zu markieren. Es bleiben immer kleine Artefakte ausgewählt, die sich irgendwo im Raum befinden und schwer zu identifizieren sind. Das Programm wies während der Tests immer wieder Stabilitätsprobleme auf. Es kam des Öfteren vor, dass die Sitzung während der Modellerstellung stehen blieb oder ein Programmabsturz folgte. Diese beiden Faktoren erschweren das Arbeiten erheblich, wodurch dieses Programm nicht weiter verfolgt wurde. Die Software 3D-Slicer hat sich bei den kostenlosen Programmen als beste Alternative herausgestellt. Es ist möglich, mit Hilfe eines Grenzwertes schnell und einfach eine Selektion durchzuführen und das Ergebnismodell als STL abzuspeichern. Dabei hat das Programm durch seine einfache Bedienung, Übersichtlichkeit und Stabilität überzeugt. Bei den Tests kam es zu keinerlei Softwareabstürzen. Bei den kommerziellen Programmen wurden insgesamt sechs Demo-Versionen getestet, wovon der Großteil nicht für die weitere Nutzung geeignet ist. Bei den Kriterien für die Bewertung und einer daraus resultierenden Aussage über die Weiternutzung wurde wie bei den Freeware-Programmen vorgegangen. Das beste kommerzielle Programm ist Amira. Es ist sehr umfangreich, bedarf aber trotzdem keiner langen Einarbeitungszeit. Es bietet eine gute Selektion und die Daten können im STL-Format gespeichert werden. Eine Besonderheit ist der Strukturbaum, der die einzelnen Arbeitsschritte aufzeichnet und eine gute Übersicht bildet. Dadurch kann auf frühere Bearbeitungsstände zurückgegriffen werden. Weiterhin besitzt es als besonderes Merkmal die Möglichkeit einer automatischen Oberflächenglättung.

## 2.2 Methoden und Werkzeuge für die Überführung von Tumorgeometrien aus PET/CT-Daten in ein 3D-Modell

Es gibt mehrere Wege, um einen Tumor aus dem CT-Datensatz zu extrahieren und diese Geometrie in einem 3D-Modell darzustellen. Für die Darstellung des 3D-Modells wurde das CAD-System CATIA V5 gewählt. Ausgehend von einer PET/CT-Untersuchung liegen die Daten im DICOM-Format vor, die den kompletten Oberkörper des Patienten in Schichten abbilden. Um diese weiterverarbeiten zu können, wird ein DICOM-Viewer benötigt, wobei hier die Wahl, wie in 2.1. beschrieben, auf das kommerzielle Programm Amira und zum anderen auf die kostenfreie Open Source Software 3D-Slicer gefallen ist. Auch wenn hauptsächlich ein kostenfreies Programm für die Bearbeitung gesucht wurde, sind die kostenpflichtigen Programme dennoch untersucht worden. Dadurch wurden eventuelle Vorteile der jeweiligen Programmklassen herausgefiltert. Die in Amira vorhandene Funktion der automatischen Glättung gibt es in 3D-Slicer nicht. Jedoch kann bei der Verwendung von 3D-Slicer die zusätzliche Software MeshLab zur Punkterückführung nachgeschaltet werden. Das Programm MeshLab gibt eine Punktwolke aus, was zur Folge hat, dass in Catia ein vollständiges Flächenmodell erzeugt werden muss. Dadurch ergeben sich, wie in Tabelle 1 und Abbildung 3 dargestellt, vier mögliche Methoden zur Generierung des 3D-Modells.

Tabelle 1: Überführungsmethoden

| Methoden<br>Werkzeuge | MM1 | MM2 | MM3 | MM4 |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|
| PET/CT                | X   | X   | X   | X   |
| Amira                 | X   |     |     |     |
| Amira mit<br>Glättung |     | X   |     |     |
| 3D-Slicer             |     |     | X   | X   |
| MeshLab               |     |     |     | X   |
| Catia                 | X   | X   | X   | X   |

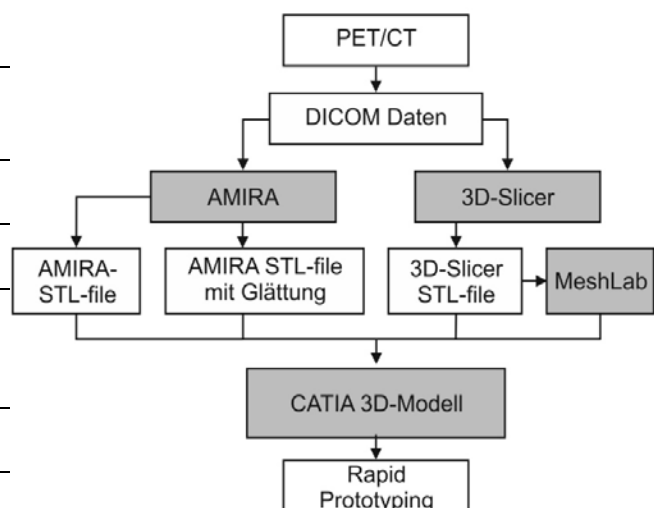


Abbildung 3: Methoden für die Überführung von Tumorgeometrien

## 2.3 Vergleich der Methoden

Um die vier Methoden zu vergleichen, wurden die Differenzen zwischen den Volumina bzw. der Oberflächeninhalte untersucht. Dazu sind zum einen die Volumina und zum anderen die Oberflächeninhalte der Tumorgeometrien in den DICOM-Viewern und den 3D-Modellen bestimmt und die relativen Abweichungen  $f$  ermittelt worden (Tabelle 2).

Tabelle 2: Vergleich der Volumina in cm<sup>3</sup> und der Oberflächen in cm<sup>2</sup>

| Methoden     | Volumina |        |        |        | Oberflächen |        |        |        |
|--------------|----------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|
| Werkzeuge    | MM1      | MM2    | MM3    | MM4    | MM1         | MM2    | MM3    | MM4    |
| DICOM-Viewer | 8,895    | 8,047  | 8,313  | 8,313  | 40,50       | 26,34  | 26,13  | 26,13  |
| 3D-Modell    | 8,956    | 8,045  | 8,387  | 8,274  | 30,03       | 24,53  | 25,22  | 23,63  |
| $f$          | 1,09 %   | 0,03 % | 0,89 % | 0,47 % | 25,85 %     | 7,56 % | 3,48 % | 9,56 % |

Werden die relativen Abweichungen bei den Volumina verglichen, wäre die Methode MM2, AMIRA mit interner Glättung, die beste Methode. Wird der Vergleich von den Ausgangsvolumina her betrachtet, fällt auf, dass sich die Volumina sehr stark unterscheiden und das Volumen von MM2 am deutlichsten von allen abweicht. Somit ist dieser Vergleich nicht zielführend. Aus diesem Grund wurde zusätzlich ein Vergleich der Oberflächeninhalte durchgeführt. Dabei liegen alle Ausgangsoberflächeninhalte bis auf MM1 im gleichen Bereich von rund 26 cm<sup>2</sup>. Somit scheidet MM1 von vornherein aus. Als beste Methode kann nach den Vergleichen die Methode MM3 mit einer relativen Abweichung bei den Volumina von 0,89 % und bei den Oberflächeninhalten von 3,48 % gewählt werden.

## 3 Herstellung des Referenzmodells

An die Verfahren und die Materialien zur Herstellung der Referenzmodelle sind besondere Bedingungen geknüpft. Zum einen sollen die physischen Modelle die aus dem 3D-Modell vorliegenden Konturen originalgetreu abbilden und zum anderen müssen die verwendeten Materialien mit dem Tracer kombinierbar und für den Einsatz im PET/CT geeignet sein. Es wurde sich im Vorfeld dafür entschieden, die Referenzmodelle als Gussmodelle herzustellen. Diese Entscheidung beruht darauf, dass die Halbwertszeit des Tra-

cers nur wenige Stunden beträgt, der Tracer in einer flüssigen Lösung vorliegt und die Herstellung in einem klinischen Umfeld durchgeführt werden muss.

### 3.1 Rapid Prototyping Verfahren

Bei der Wahl des Rapid Prototyping Verfahrens wurden auf die am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik an der Universität Rostock verfügbaren Verfahren zurückgegriffen. Dabei stand das RP-Verfahren Fused Deposition Modeling (FDM) und das High Speed Cutting (HSC) zur Auswahl. Weiterhin wurde unterschieden, ob aus dem 3D-Modell eine Gussform abgeleitet oder das 3D-Modell direkt hergestellt wird. Bei der Direktherstellung des 3D-Modells muss im Anschluss mittels einer Abformmasse die Gussform abgenommen werden. Die Methoden sind in Tabelle 3 und Abbildung 4 dargestellt.

Tabelle 3: Herstellungsmethoden

| Methoden<br>Werkzeuge | MR1 | MR2 | MR3 | MR4 |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|
| 3D-Modell             | X   | X   | X   | X   |
| HSC Modell            |     | X   |     |     |
| HSC Gussform          | X   |     |     |     |
| FDM Modell            |     |     |     | X   |
| FDM Gussform          |     |     | X   |     |
| Referenzmodell        | X   | X   | X   | X   |

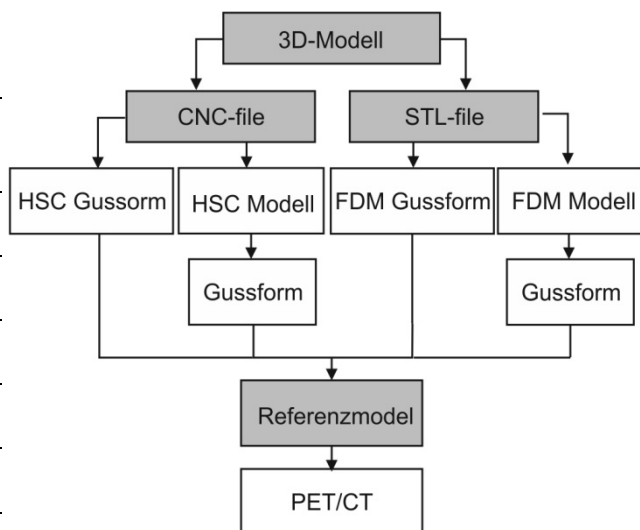


Abbildung 4: Herstellungsmethoden des Referenzmodells

Nach genauerer Betrachtung und Bewertung wurde die Methode MR1 gewählt. Die Hauptgründe für die Wahl liegen zum einen darin, dass im Gegensatz zu den Methoden MR2 und MR4 ein Arbeitsschritt weniger gebraucht wird und somit mögliche Fehlerquellen, die mit einem Qualitätsverlust einhergehen, minimiert werden. Zum anderen sind die Oberflächengüte und die Formgenauigkeit der HSC Formen besser, was eine höhere Detailgenauigkeit zur Folge hat. Es wurden jeweils sieben Probegussformen mit der Methode MR1 und MR3 hergestellt und im Anschluss vermessen. Die Formen hatten eine Kugelgeometrie mit einem Soll-Volumen von 40 ml, was einem Solldurchmesser von 42,43 mm entspricht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Vergleich der Durchmesser in mm

| Probendurchmesser | P1    | P2    | P3    | P4    | P5    | P6    | P7    | <i>f</i> |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| Methoden          |       |       |       |       |       |       |       |          |
| MR1               | 42,44 | 42,33 | 42,58 | 42,32 | 42,34 | 42,24 | 42,66 | 0,036 %  |
| MR2               | 42,79 | 42,60 | 42,55 | 42,75 | 42,63 | 42,50 | 42,43 | 0,415 %  |

Wie deutlich zu erkennen ist, liegen beide Methoden mit einer relativen Abweichung von unter 0,5 % in einem sehr guten Bereich und könnten daher Verwendung finden. Es wurde sich aufgrund der um den Faktor  $\approx 10$  besseren relativen Abweichung von 0,415 % zu 0,036 % für die Methode MR1 entschieden.

### 3.2 Abformmaterialien

Bei der Auswahl der Abformmaterialien wurden Epoxidharz, Silikonkautschuk, medizinisches A-Silikon, Gips, Keramik und Alginat betrachtet. Hauptkriterien waren unter anderem Mischbarkeit, Topf- und Aushärtezeit und Detailgenauigkeit. Der Tracer liegt im klinischen Alltag in einer wässrigen Lösung vor, somit fallen das Epoxidharz, der Silikonkautschuk und das medizinische A-Silikon raus, da sie nicht wasserlöslich sind. Mit den verbliebenen drei Materialien wurden Probekörper gegossen und verglichen.



Abbildung 5: Abformmodelle links: Gießkeramik, rechts: Alginat

Der Gips und die Keramik wiesen viele und große Lufteinschlüsse bzw. Oberflächen- ausbrüche auf. Das wurde auch bei Versuchen mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen nicht deutlich besser. Weiterhin ist im Bereich des Angusses eine Nacharbeit erforderlich. Es kommt in dem Bereich entweder zu großen Ausbrüchen, was ein Nachgießen

zur Folge hat, oder zu einem Überhang, welcher nachgeschliffen werden muss. Das ist in Anbetracht der zeitlichen Vorgaben durch die Halbwertszeit des Tracers und den Reinheitsauflagen im klinischen Umfeld nicht durchführbar. Mit dem Alginat hingegen lassen sich sehr gute Ergebnisse erzielen. Das Problem im Bereich des Angusses wird durch ein Übermaß beseitigt, welches einfach entfernt werden kann, da Alginat weich und gut schneidbar ist. Die in Abbildung 5 (rechts) zu sehenden Ausbrüche und Risse wurden durch Versuche mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen verschiedener Alginat erfolgreich entfernt. Es wurde dabei blaues und beiges Alginat des Herstellers „Troll Factory Bremen“ miteinander kombiniert. Beide Alginat weisen unterschiedliche Eigenschaften auf. Das blaue Alginat ist fest, formstabil, aber nicht sehr detailgetreu. Das beige Alginat ist weich, nicht formstabil, aber sehr detailgetreu. Es wurden verschiedene Mischungsverhältnisse auf die Verarbeitungszeit (VZ in min), die Aushärtezeit (AZ in min), die Größe der Einschlüsse (GE in mm) und die relative Abweichung des Probendurchmessers ( $f$  in %) zum Soll-Durchmesser 37 mm untersucht.

Tabelle 5: Mischungsverhältnis (MV) von Alginaten

| MV        | blau | 1:1  | 1:2  | 1:3  | 1:4  | beige |
|-----------|------|------|------|------|------|-------|
| Kriterien |      |      |      |      |      |       |
| VZ        | 2,5  | 3,5  | 4    | 4,5  | 5,5  | 6     |
| AZ        | 7    | 9    | 10   | 12   | 14   | 20    |
| GE        | 1,1  | 1,0  | 1,0  | 1,4  | 2    | 1,5   |
| $f$       | 1,49 | 1,95 | 1,49 | 1,95 | 1,08 | 0,05  |

Dabei hat sich aus dem Vergleich der Formstabilität und der Detailgenauigkeit, dargestellt in Tabelle 5, das Mischverhältnis 1:2 als beste Lösung herausgestellt. In Abbildung 9 sind Probeschnitte des blauen Alginats, des Mischungsverhältnisses 1:2 und des beigen Alginats dargestellt.

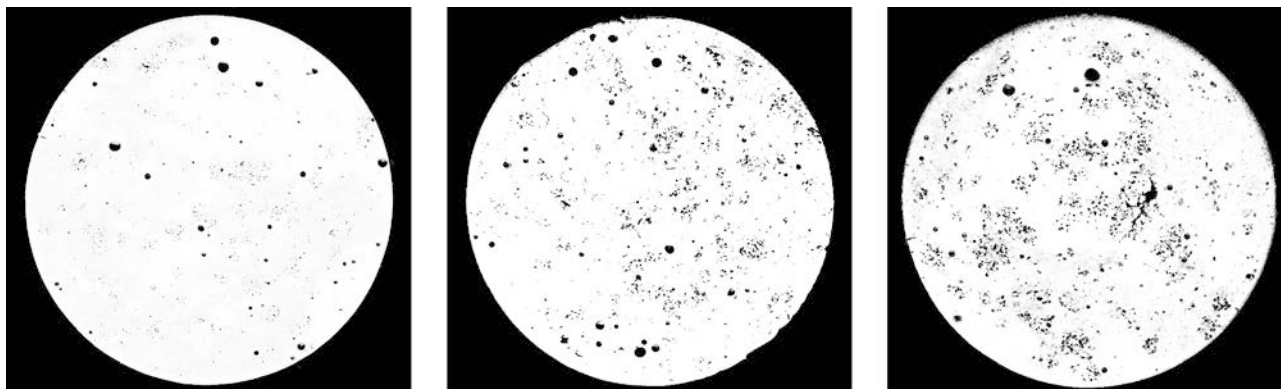


Abbildung 6: Schnittflächen von links nach rechts: pur blau, MV 1:2, pur beige

#### 4 Experimentelle Untersuchungen im PET/CT

Um eine endgültige Aussage über die hier vorgestellten Methoden und Werkzeuge zu bekommen, wurden Kugelproben aus dem Alginatmix 1:2 in Kombination mit dem Tracer F18 hergestellt und im PET/CT sichtbar gemacht. Dazu wurden die mit dem Tracer versetzten Proben in einem Phantomkörper angebracht und anschließend im PET/CT gescannt (Abbildung 7 links).

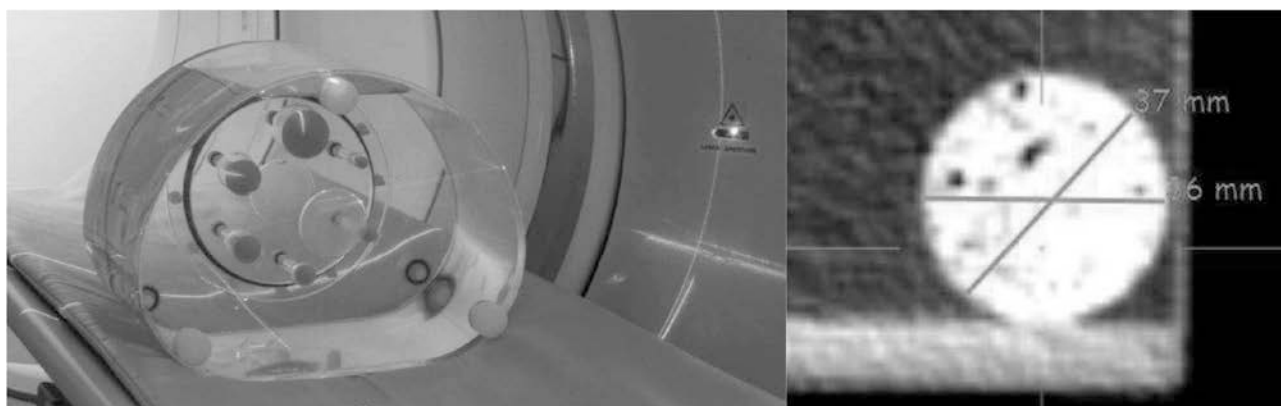


Abbildung 7: links: Phantomkörper im PET/CT, rechts: PET/CT-Scan der Probe

Das Ergebnis (Abbildung 7 rechts) zeigt eine sehr gute homogene Verteilung des Tracers in der Kugelgeometrie ohne Randschichteffekt sowie eine sehr gute Vermessungsmöglichkeit des Probekörpers. Der Probekörper hat wie in 3.2 beschrieben einen Durchmesser von 37 mm. Die Messwerte im PET/CT lagen zwischen 36 – 37 mm.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der vorgestellten Methode ist es möglich, Referenzmodelle für die Kalibrierung von PET/CTs herzustellen. Weiterhin können die Referenzmodelle dazu genutzt werden, die vorhandenen Berechnungsalgorithmen zur Festlegung der Bestrahlungsbereiche bei Tumorbehandlungen auf Grundlage von PET/CT-Daten zu verbessern und erstmals an realitätsnahen Referenzmodellen zu validieren. Die Qualität des 3D-Modells mit der hier vorgestellten Generierungsmethode ist mit einer relativen Abweichung der Oberflächen von 3,48 % in einem sehr guten Bereich. Darüber hinaus wurde mit dem vorgestellten Alginitmix ein Material gefunden, welches vollkommen den Anforderungen an die PET/CT-Untersuchungen entspricht. Dieses hat sich auch in den experimentellen Untersuchungen im PET/CT bestätigt. Die experimentelle Validierung der Referenzmodelle mit Tumorgeometrien brachten ähnlich positive Ergebnisse [4]. Im weiteren Vorgehen soll der Einfluss ateminduzierter Bewegungen der Läsionen auf den PET/CT-Bildgebungsprozess untersucht werden. Ziel ist es, ein Validierungs- und Optimierungsverfahren für Kontierungsalgorithmen unter Bewegungseinfluss zu generieren, da aufgrund der Bewegung ein Rauschen in den PET/CT-Scans im Bereich der Tumore zu beobachten ist. Dazu wird eine Kinematik entwickelt, die die Tumorsurrogate (Referenzmodelle) während des Bildgebungsprozesses auf Trajektorien bewegt, die den Bewegungen der Tumore während der Atmung entsprechen. Durch Kenntnis der Tumorgeometrien der Referenzmodelle und der Bewegungstrajektorien wird es möglich sein, die Kontierungsalgorithmen daraufhin zu optimieren.

## Literatur

- [1] Wieler, H.J.: *PET in der klinischen Onkologie*, Darmstadt: Steinkopf-Verlag 1999
- [2] Plichta, K.: *Wertigkeit der Positronen-Emissions- Tomographie (F-18 FDG-PET) und der Spiral-CT beim Staging und Re-Staging nichtkleinzelliger Bronchialkarzinome und zur Diagnostik unklarer pulmonaler Rundherde: PET versus CT: NSCLC und SPN*, Hamburg: Verlag Dr. Kovac 2001
- [3] Bazanez-Borgert, M., et al.: *Radioactive spheres without inactive wall for lesion simulation in PET*, Z. Med. Phys. 18, 37-42, 2008
- [4] Jonuschies, I.; Kurth, J.; Krause, B.; Broekel, K.: *Reference 3D-tumor models from CT-data for evaluation of contouring algorithm for the PET/CT*. Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping , VRAP, Leiria, 2013



# CAD-neutrale 3D-Mastermodelle als zentrale Informationsträger in verteilten Entwicklungsprojekten

Alexander Christ, Reiner Anderl

Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion, Technische Universität Darmstadt

Otto-Berndt-Str. 2, 64287 Darmstadt

E-Mail: christ@dik.tu-darmstadt.de; Internet: <http://www.dik.tu-darmstadt.de>

**Inhalt:** In diesem Paper wird das Konzept für den Einsatz von standardisierten und CAD-neutralen Datenformaten als Basis für 3D-Mastermodelle vorgestellt. Als Grundlage dienen die etablierten Datenformate STEP und JT. JT wird primär zur effizienten Visualisierung von 3D-Produktdaten eingesetzt und STEP AP242 für die Bereitstellung eines XML-Schemas zur Integration von JT und Metadaten. Die 3D-Mastermodelle ermöglichen die Integration von Informationen aus verschiedenen Autorensystemen und fungieren als zentrale Informationsträger in Entwicklungsprojekten. Die Anbindung an ein PDM-System stellt Funktionalitäten wie Elementverwaltung und Privilegienverwaltung zur Verfügung. Mit den 3D-Mastermodellen werden Informationen in geeigneter Form für CAx-Prozessketten, wie Simulation, Fertigung und Montage zur Verfügung gestellt. Der Einsatz von Mobilgeräten wird unterstützt. Aufgrund des Einsatzes von standardisierten und CAD-neutralen Formaten wird die Interoperabilität auf Systemebene verbessert und Kosten für Softwarelizenzen werden eingespart.

**Abstract:** In this paper the concept for the application of standardized and CAD-neutral data formats as basis for 3D master models is introduced. Therefore, the established data formats STEP and JT are used. JT is used for the efficient visualization of 3D product data. STEP AP242 provides a XML scheme for the integration of JT and meta data. The 3D master models enable the information integration of different authoring systems and serve as central information carrier in development projects. Through the linkage to a PDM system, functionalities like element management and privilege management are deployed. The 3D master models provide information for CAx process chains like simulation, manufacturing and assembling in a suitable form. The application of mobile devices is supported. Due to the usage of standardized and CAD-neutral formats, interoperability is improved and license costs are reduced.

**Stichwörter:** CAx, Informationsintegration, Interoperabilität, JT, 3D-Mastermodelle, STEP AP242 XML

**Keywords:** CAx, information integration, interoperability, JT, 3D master models, STEP AP242 XML

## 1 Einleitung

Kürzer werdende Produktlebenszyklen und steigende Komplexität von Produkten erfordern effiziente, rechnerbasierte Methoden und Werkzeuge zur Unterstützung der Produktentwicklung. Die Digitalisierung von Produkten und zugehörigen Prozessen bietet da-

bei ein immenses Potenzial für Zeit- und Kosteneinsparungen sowie zur Gewährleistung eines definierten Qualitätsniveaus. Ziel ist die Implementierung einfacher Lösungen für die effiziente Integration und Nutzbarmachung von CAX-Informationen auf Basis von Standards [1].

In diesem Paper wird das Konzept für CAD neutrale 3D-Mastermodelle als zentrale Informationsträger in verteilten Entwicklungsprojekten vorgestellt. Als Grundlage dienen hierbei die beiden standardisierten Neutralformate STEP und JT. JT fungiert primär zur performanten Visualisierung von Produktdaten. STEP AP242 XML bildet das zentrale Schema und ermöglicht die Integration von Metadaten wie Produktstrukturen, Fertigungsinformationen oder Kinematikinformationen. Der gewählte Ansatz spiegelt damit den Bedarf vor allem der Automobilindustrie wider, greift bestehende Vorarbeiten auf und entwickelt sie weiter [2]. Durch den Einsatz von Mobilgeräten können alle relevanten Informationen effizient zur Verfügung gestellt und Kosten für Lizenzen und Mitarbeiterqualifikationen reduziert werden.

## **2 Datenformate in CAX-Prozessketten**

Die effiziente Entwicklung von Produkten erfordert den Einsatz einer Vielzahl von rechnergestützten Systemen innerhalb der Phasen des Produktlebenszyklus. Computer-Aided Design (CAD)-Systeme unterstützten die Entwicklung und Konstruktion von Produkten und stellen 3D-CAD-Modelle für nachgelagerte CAX-Prozessketten wie Finite-Elemente-Analyse (FEA), Mehrkörpersimulation (MKS) oder Arbeitsvorbereitung und Fertigung zur Verfügung [3]. Für die rechnerinterne Repräsentation von Informationen verwenden die CAX-Systeme spezifische Datenmodelle in Kombination mit darauf abgestimmten nativen bzw. proprietären Datenformaten. Proprietäre Datenformate sind in der Regel kostenpflichtig, nicht standardisiert und nur bedingt erweiterbar [4]. Der Einsatz von proprietäre Datenformate im Kontext eines spezifischen Systems ist durchaus sinnvoll, jedoch sind sie nur bedingt für den Datenaustausch zwischen verschiedenen Systemen geeignet [5]. Für den systemübergreifenden Datenaustausch werden neutrale Datenformate genutzt. Konverter realisieren hierbei die Transformation der Datenformate für den Datenimport und -export. Optimal ist hierbei der Einsatz von standardisierten Neutralformaten wie STEP und JT zur Gewährleistung einer einheitlichen Datenstruktur und -konsistenz. Zudem eröffnen sie Potenziale zur Verbesserung der Interoperabilität in hete-

rogenen IT-Systemlandschaften und für Kosteneinsparung durch die Reduktion von Lizenzkosten [6, 7]. Im Folgenden werden die beiden standardisierten Neutralformate STEP AP242 und JT näher beschrieben.

## 2.1 STEP AP 242

STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) ist der Arbeitstitel der Normenreihe ISO 10303 "Product Data Representation and Exchange" und dient zur formalen Beschreibung von Produktdaten. STEP ermöglicht die Integration von Produktdaten aus allen Produktlebenszyklusphasen und die rechnergestützte, medienbruchfreie Bereitstellung der Produktdaten für verschiedene Anwendungssysteme. Als Spezifikation dient das Integrierte Produktdatenmodell. Integrierte Anwendungen fungieren als Grundlage für CAX-Prozessketten und ermöglichen einen durchgängig rechnergestützten Produktentwicklungsprozesses. Die Normenreihe stellt für die Nutzung Applikationsprotokolle (AP) zur Verfügung [8]. Das STEP Applikationsprotokoll 10303-242 "Managed model-based 3D engineering" [9] vereint die beiden wichtigen Normen ISO 10303-203 [10] und ISO 10303-214 [11] aus der Luftfahrt- und Automobilindustrie und erweitert diese um neue Konzepte. Mit dem Business Object Model wird in STEP AP 242 ein neues Architekturkonzept eingeführt. Es stellt Funktionalitäten für Metadaten zur Verfügung, die über die reine Geometrie und Topologie hinausgehen, wie Produktstruktur, Material oder Kinematik [12, 13], siehe Abbildung 1.

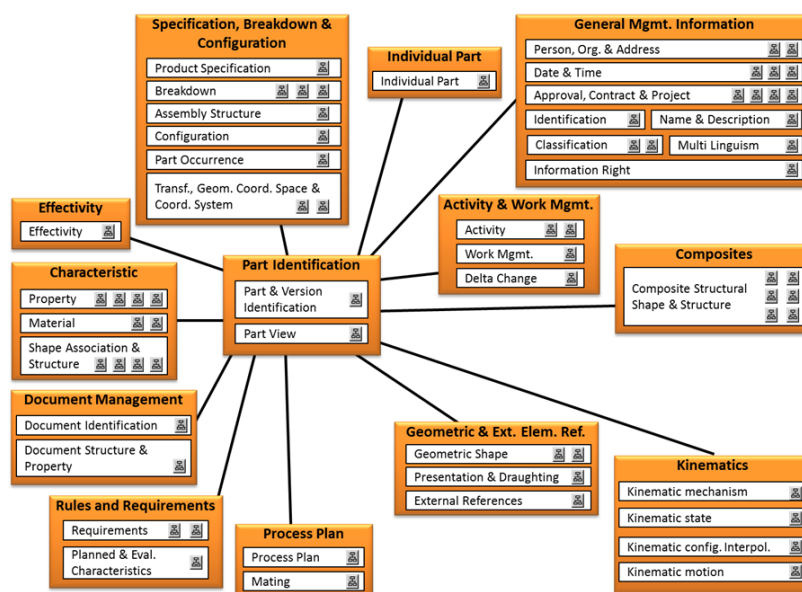


Abbildung 1: Funktionen des Business Object Model [12]

Das Business Object Model stellt ein XML-Schema bereit, das die Integration von geometrischen Informationen aus externen Formaten ermöglicht, z. B. native CAD-Formate, JT oder PDF. Mit der zusätzlichen Funktionalität von STEP AP 242 XML können neben der Integration von externen Dateien auch Elemente innerhalb dieser externen Dateien (Achse, Kante, Kurve, etc.) referenziert werden. Dies ermöglicht die effiziente Kombination von standardisierten Neutralformaten wie STEP und JT [12, 13].

## 2.2 Das JT-Format

JT ist ein performantes Datenformat zur Erzeugung von 3D Visualisierungsmodellen und als ISO 14306 „JT file format specification for 3D visualization“ [14] genormt. Das komprimierbare Binärformat verfügt über eine CAD-neutrale Beschreibung. JT ermöglicht die Integration verschiedener Geometrierepräsentationen, von tessellierten Darstellungen mit unterschiedlichen Level of Detail (LOD), über mathematische exakt beschriebene B-Rep Modelle, bis hin zu Ultra Light Weight (ULP) Repräsentationen für exakte Visualisierungsmodelle bei kleinen Dateigrößen. Metadaten wie Produktstrukturen und Fertigungsinformationen (engl. Product Manufacturing Information, PMI) werden von JT unterstützt [14], siehe Abbildung 2.

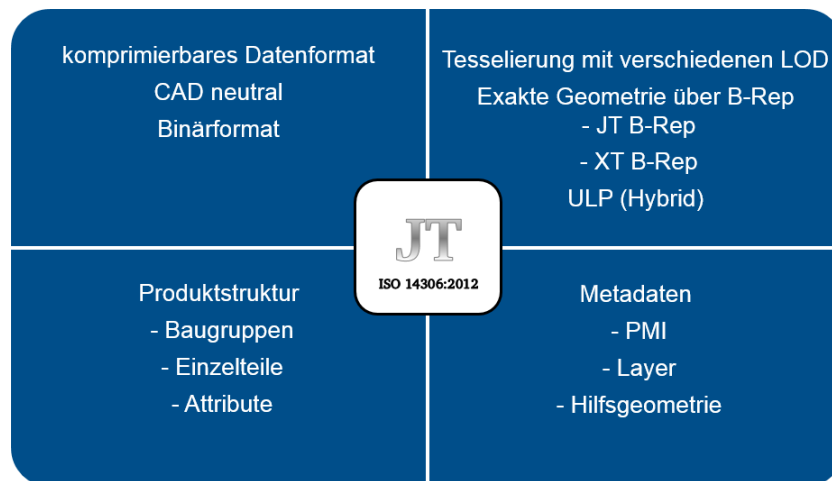


Abbildung 2: JT-Datenformat [7]

Für JT ergeben sich drei Einsatzgebiete: Visualisierung, Datenaustausch und Collaborative Engineering. Die Stärken von JT liegen auf Grund der Vielfalt an möglichen Geometrierepräsentationen im Bereich der Visualisierung von 3D-Produktdaten. Viewer ermöglichen dabei auch den Einsatz auf Mobilgeräten. Durch die CAD-neutrale Beschrei-

bung und kleine Dateigrößen ist es zudem für multi-CAD-Anwendungen und den Austausch von 3D-Produktdaten geeignet. Dies ermöglicht den Einsatz von JT in den der Produktentwicklung nachgelagerten Prozessen (DMU, Simulation, Fertigung, etc.) in Form eines standardisierten, neutralen Prozessformats [15].

### **3 Konzept für CAD-neutrale 3D-Mastermodelle**

3D-CAD-Mastermodelle stellen einen etablierten und verbreiteten Ansatz dar. Sie sind freigegebene Datensätze, die einen definierten Entwicklungsstand abbilden. Sie dienen als Grundlage und Referenz im gesamten Produktentwicklungsprozess und ermöglichen die kontinuierliche Überprüfung des Qualitätsniveaus. Basierend auf dem integrierten Produktdatenmodell können in Verbindung mit einer geeigneten PDM-Anbindung alle relevanten Informationen zentral gespeichert, verwaltet und zur Verfügung gestellt werden. Durch die Schaffung dieser neutralen Schnittstelle können Kosten und Aufwand reduziert werden. Zudem wird die Interoperabilität von Systemen, Prozessen und Datenformaten verbessert [8]. Vor allem in den der Produktentwicklung nachgelagerten Prozessen werden oftmals jedoch nur sehr spezifische Informationen benötigt. Hier ist eine umfassende Funktionalität, wie sie moderne CAX-Systeme bereitstellen, in der Regel nicht erforderlich. Die Anzahl der Nutzer von CAD-Daten im Engineering-Bereich ist ungefähr um den Faktor 10 höher als die der Datenerzeuger in der Entwicklung [15]. Der Einsatz von mächtigen CAX-Systemen in der Entwicklung ist durchaus berechtigt, jedoch muss im Zuge einer effizienten Produktentstehung deren Einsatz in nachgelagerten Prozessen wie Fertigung, Montage und Vertrieb kritisch hinterfragt werden. Der in der Automobilindustrie favorisierte Ansatz zur Kombination des etablierten JT-Formats mit dem neu entwickelten AP242-Schema der STEP Normenreihe [2] wird an dieser Stelle berücksichtigt. Das in diesem Paper vorgestellte Konzept von standardisierten Neutralformaten wie STEP AP242 und JT als Basis für 3D-Mastermodelle ermöglicht eine ganzheitliche Informationsintegration sowie eine Verbesserung der Interoperabilität in der global verteilten Produktentwicklung und eröffnet ein großes Potential für weitere Kosteneinsparungen.

#### **3.1 Architektur basierend auf STEP AP242 XML und JT**

Die Architektur des Konzepts besteht aus drei Modulen: Informationsintegration, Verwaltung und Informationsbereitstellung, siehe Abbildung 3. Das Modul Informationsintegra-

tion beinhaltet alle Datenformate aus den nativen CAX-Systemen, Neutralformate wie STEP, JT und 3D PDF, Scandaten, Technische Zeichnungen sowie zusätzliche Metadaten. Über ein Konverter Tool werden die eingehenden Informationen importiert und klassifiziert. Dabei wird hauptsächlich zwischen exakten geometrisch-topologischen Informationen, tesselierten Daten und Metadaten unterschieden. Auf Basis der Klassifizierung werden die Informationen dem JT oder dem STEP AP242 Segment im 3D-Mastermodell zugeordnet. Das Verwaltungsmodul beinhaltet die 3D-Mastermodelle sowie die Anbindung an ein PDM-System zur Ablage aller Daten. Durch die PDM-Anbindung kann auf wichtige Funktionen wie Elementverwaltung, Privilegienverwaltung und Ablaufverwaltung zurückgegriffen werden. Dies ermöglicht die strukturierte, zentrale Verwaltung der 3D-Mastermodelle unter Berücksichtigung des Versionsstandes von Einzelteilen und Baugruppen.

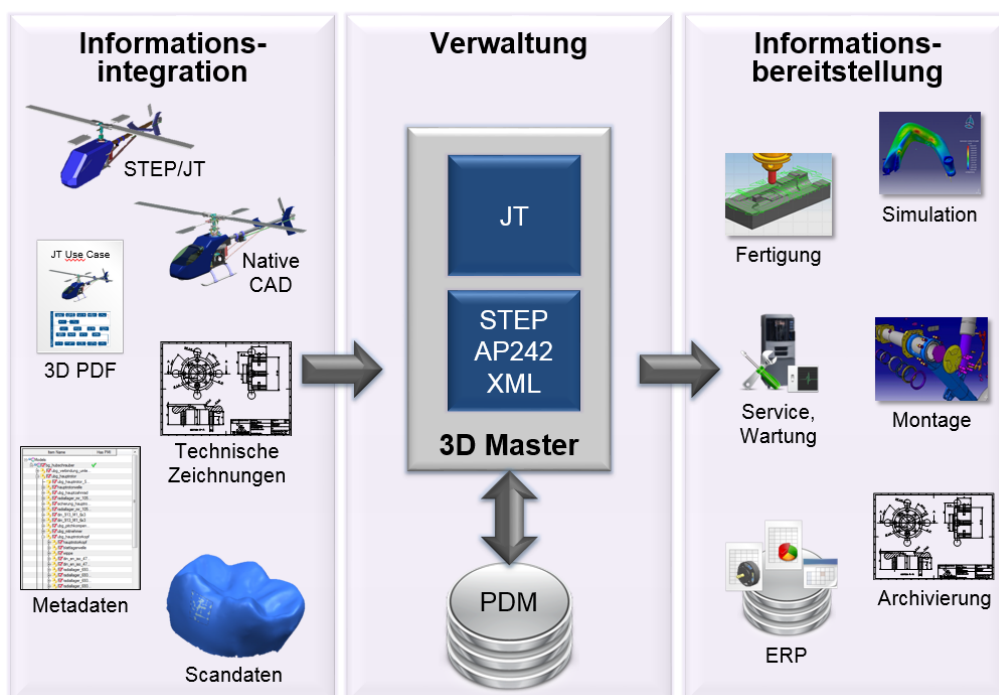


Abbildung 3: Architektur für CAD-neutrale 3D-Mastermodelle

Im Modul Informationsbereitstellung werden alle benötigten Informationen für die CAX-Prozessketten zur Verfügung gestellt. Das grundlegende Schema hierfür stellt STEP AP242 bereit. In vielen CAX-Prozessketten kann JT als neutrales Prozessformat genutzt werden, vor allem wenn der Fokus auf der effizienten Visualisierung von 3D-Produktdaten liegt. In diesen Fällen ist auch der Einsatz von Mobilgeräten mit den entsprechenden Vie-

wern sinnvoll, z. B. zur ortsunabhängigen Informationsbereitstellung in der Montage. Zusätzlich sind bei Bedarf Metadaten über STEP AP242 abrufbar. Die Stärken des Konzepts werden aber vor allem dann realisiert, wenn STEP AP242 und JT gemeinsam zum Einsatz kommen.

### **3.2 Einsatzgebiete der CAD-neutralen 3D-Mastermodelle**

Die Einsatzfähigkeit der CAD-neutralen 3D-Mastermodelle erstreckt sich über den gesamten Produktlebenszyklus. Die Verwendung der standardisierten und in der Industrie bewährten Formate STEP und JT vereinfacht die Integration von Informationen aus verschiedenen Autorensystemen und deren Bereitstellung in CAx-Prozessketten. Dadurch wird ein durchgängiger Informationsfluss ohne Medienbruch und die konsequente Nutzung von 3D-Modellen in allen Phasen des Produktlebenszyklus ermöglicht. Das Konzept der 3D-Mastermodelle unterstützt klassische Aufgaben der Produktentwicklung wie Anforderungsermittlung, Konzeption und Entwurf. Da bei Neuentwicklungen in der Regel noch keine 3D-Modelle vorliegen, bestenfalls jedoch grobe Abmessungen des Bauraums, werden Bounding Boxes als Platzhalter für Einzelteile und Gestalträume im 3D-Modell eingesetzt. Anforderungen werden über semantische Annotationen am 3D-Mastermodell angebracht, dies kann auch über Mobilgeräten realisiert werden. Aktuelle Forschungen beschäftigen sich mit einer automatisierten Übertragung dieser Annotationen in eine formalisierte Anforderungsliste.

Im Laufe der Produktentwicklung werden zu festgelegten Zeitpunkten Design Reviews durchgeführt. Durch die Anbindung der 3D-Mastermodelle an das PDM-System können Informationen zu Kosten, Werkstoffen und Reifegrad abgerufen werden. Diese Informationen können direkt an den 3D-Mastermodellen über eine Farbcodierung und semantische Annotationen visualisiert werden. Auf Grund der CAD-neutralen Formate sind hierfür nur Viewer notwendig. Dies spart Kosten für CAD-Lizenzen und ermöglicht den Einsatz von Mobilgeräten. Über definierte Schnittstellen können die 3D-Modelle auch in Office-Dokumente und 3D PDF Dokumente eingebunden werden. Das größte Potenzial der 3D-Mastermodelle eröffnet sich in der Bereitstellung von 3D-Modellen mit zugehörigen Informationen für CAx-Prozessketten. Digital Mock-Ups (DMU) sollen durch die 3D-Mastermodelle nicht ersetzt, aber durch die mögliche, vereinfachte Anreicherung mit Metadaten verbessert werden. Für die Finite-Elemente-Analyse ergibt sich durch die Kombi-

nation von STEP AP242 und JT eine reizvolle Alternative gegenüber nativen CAE-Formaten. Im Bereich der Mehrkörpersimulation (MKS) ermöglicht diese Kombination den Transfer von Kinematikinformationen zwischen verschiedenen CAx-Systemen. Die Produktion wird durch die Ableitung von Maschinencode für die Fertigung von Bauteilen unterstützt. In der Montage ermöglichen die 3D-Mastermodelle die Bereitstellung von performanten 3D-Modellen und Zusammenbausimulationen.

#### **4 Exemplarischer Anwendungsfall Produktion**

Für die Validierung des Konzepts wird ein Anwendungsfall aus der Produktion betrachtet, in dem ein Bauteil die drei Module Informationsintegration, Verwaltung und Informationsbereitstellung durchläuft. Es wird verdeutlicht welche Informationen dem JT und dem STEP AP242 Segment zugeordnet werden und wie die 3D-Mastermodelle in der Produktion zur Informationsbereitstellung genutzt werden können. Der medienbruchfreie Informationsfluss steht dabei im Vordergrund. In der Produktion besteht der Auftrag 80 Pneumatikzylinder herzustellen. Aufgrund einer funktionellen Änderung des Zylinderdeckels muss zunächst ein neues Bauteil im nativen CAD System konstruiert werden. Im nächsten Schritt werden die relevanten Fertigungsinformationen in Form von PMI dem CAD-Modell hinzugefügt. An diesem Punkt besteht die Option eine Technische Zeichnung des Zylinderdeckels abzuleiten und im PDM-System zu speichern, siehe Abbildung 4.



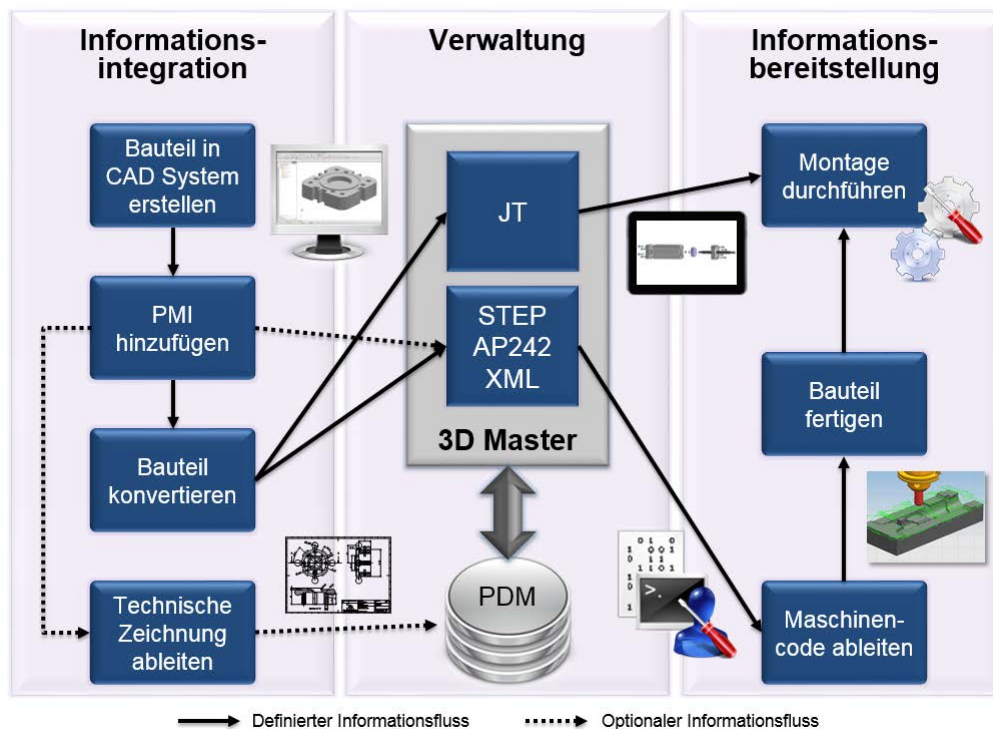


Abbildung 4: Exemplarischer Anwendungsfall Produktion

Im nächsten Schritt wird das CAD-Modell konvertiert und die Informationen den JT und STEP AP242 Segmenten zugeordnet. Ein tesseliertes Modell wird dem JT Segment zugewiesen, ein mathematisch exaktes B-Rep Modell mit Produktstruktur und Metadaten dem STEP AP242 Segment. Für das neue Bauteil wird im 3D-Master ein neues Item inklusive Version angelegt und im PDM-System gespeichert. Über eine Identifizierungsnummer erfolgt die Zuordnung zu der bestehenden Baugruppe des Pneumatikzylinders. Ausgehend von dem B-Rep-Modell und den Metadaten im STEP AP242 Segment kann Maschinen-code für die CAD/CAM-Prozesskette abgeleitet werden. Damit können die beauftragten Zylinderdeckel gefertigt werden. Im letzten Schritt müssen die Pneumatikzylinder montiert werden. Das JT Segment des 3D-Masters stellt hierfür Produktinformationen als 3D-Modellen in Form von Einzelteilen, Baugruppen und Explosionsdarstellungen zur Verfügung. Aufgrund der kleinen Dateigrößen können die tesselierten 3D-Modelle schnell über Viewer auf Mobilgeräten visualisiert werden. Durch den Einsatz von Mobilgeräten in der Montage werden Hardwarekosten für stationäre Workstations und Lizenzkosten für CAD-Systeme eingespart.

## 5 Fazit und Ausblick

Das vorgestellte Konzept ermöglicht die Nutzung von standardisierten und CAD-neutralen Formaten als 3D-Mastermodelle. Informationen aus unterschiedlichen Autoren-systemen können integriert und für die Nutzung in CAx-Prozessketten bereitgestellt werden. Das JT Segment erlaubt die effiziente Visualisierung von 3D-Produktdaten. Auf Basis von Viewern ist auch der Einsatz von Mobilgeräten möglich. Das STEP AP242 Segment stellt das XML-Schema zur Integration von JT und Metadaten zur Verfügung. Über die Anbindung an ein PDM-System werden bewährte Funktionalitäten wie Element- und Privilegienverwaltung in die 3D-Mastermodelle integriert. Durch die 3D-Mastermodelle wird auf Systemebene eine Art neutrale Schnittstelle realisiert. Dies spart Kosten durch die Reduzierung von systemspezifischen Schnittstellen und verbessert die Interoperabilität. Der Einsatz von standardisierten Neutralformaten führt zur Reduktion der Anzahl von CAD-Systemen, wodurch Lizenzkosten eingespart und Mitarbeitern der Zugriff auf Informationen erleichtert wird. Für STEP und JT steht bereits eine Vielzahl an Softwareapplikationen zur Verfügung. Zukünftige Forschungen werden die Integration dieser Applikationen fokussieren, um eine Bereitstellung von 3D-Modellen entlang des gesamten Produktlebenszyklus zu realisieren. Im Zuge dessen muss auch das Konverter Tool zur Integration der Informationen aus den verschiedenen Datenquellen weiterentwickelt werden. Aktuelle Forschungen beschäftigen sich mit der Entwicklung eines erweiterten Informationsmodells für die 3D-Mastermodelle. Dabei wird auch die Integration weiterer Neutralformate analysiert.

## Literatur

- [1] Dotzauer, Rudolf; Handschuh, Sebastian; Fröhlich, Arnulf: *Standardized Formats for Visualization - Application and Development of JT*. 19th ISPE International Conference on Concurrent Engineering (CE2012), Trier, 2012
- [2] Emmer, Christian; Fröhlich, Arnulf; Stjepandic, Josip: *Advanced Engineering Visualization with Standardized 3D Formats*. In: Kovacs, George L.; Kochan, Detlef (Eds.): *Digital Product and Process Development Systems*, Springer, 2013
- [3] Eigner, Martin; Stelzer, Ralph: *Product Lifecycle Management - Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*, Springer, 2009. ISBN: 978-3-540-44373-5

- 
- [4] Vornholt, Stephan; Stoye, Michael; Geist, Ingolf; Köppen, Veit; Saake, Gunter: *Datenmodell zur flexiblen Verwaltung von Datenaustauschprozessen in der virtuellen Produktentwicklung*. In: Kasper, Roland (Ed.): 10. Magdeburger Maschinenbau-Tage, Magdeburg, 2011
  - [5] Anderl, Reiner; Binde, Peter: *Simulationen mit NX - Kinematik, FEM, CFD, EM und Datenmanagement*, Hanser, 2014. ISBN: 978-3-446-43921-4
  - [6] Vettermann, Steven: *JT und STEP in die Praxis bringen*. In: PorSTEP iViP Produktdaten Journal, Nr. 2, 2013. ISSN 1436-0403
  - [7] Eigner, Martin; Handschuh, Sebastian; Gerhardt, Florian: *Concept to Enrich Lightweight, Neutral Data Formats with CAD-based Feature technology*. Computer-Aided Design and Applications, 7(1), pp. 89-99, 2010
  - [8] Anderl, Reiner; Trippner, Dietmar: *STEP. Standard for the Exchange of Product Model Data. Eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP)*. Teubner, 2000. ISBN: 978-3-519-06377-3
  - [9] International Organization for Standardization: *Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 242: Application protocol: Managed model-based 3D engineering*. ISO/DIS 10303-242
  - [10] International Organization for Standardization: *Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 203: Application protocol: Configuration controlled 3D design of mechanical parts and assemblies*. ISO 10303-203:2011
  - [11] International Organization for Standardization: *Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 214: Application protocol: Core data for automotive mechanical design processes*. ISO 10303-214:2010
  - [12] STEP AP242 Project [Online], 2014. <http://www.ap242.org> (22.08.2014)
  - [13] Ungerer, Max: *STEP AP 242 - Managed Model Based 3D Engineering*. In: PorSTEP iViP Produktdaten Journal, Nr. 2, 2013. ISSN 1436-0403
  - [14] International Organization for Standardization: *Industrial automation systems and integration - JT file format specification for 3D visualization*. ISO 14306:2012
  - [15] ProSTEP iViP: *JT in der Anwendung. Entscheidungshilfen zum Einsatz von JT in der Praxis*, Version 2, 2010



# Automatisierte Parameterstudien in der Finiten-Elemente-Analyse zur Verbesserung des Leichtbaupotenzials von Sandwichstrukturen

Frank Rudolph, Felix Viebahn, Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth

E-Mail: frank.rudolph@uni-bayreuth.de; Internet: <http://www.lscad.de>

**Inhalt:** Dieser Beitrag stellt einen automatisierten Strukturgenerator aufbauend auf der Finite-Elemente-Analyse Software Z88Aurora vor, der es durch automatisiertes Preprocessing ermöglicht, einen nach ASTM C393-00 genormten Vierpunkt-Biegeversuch eines Prüfkörpers zu simulieren. Dieser Prüfkörper besteht aus einem durch Harzinfiltration hergestellten Sandwichmaterial, in dessen Kern durch Einschnitte stabile Harzstege, im Folgenden auch Versteifungen genannt, eingebracht werden. Im Rahmen einer Parameterstudie werden die Möglichkeiten dieses Strukturgenerators dargestellt und der Einfluss der Anzahl dieser Versteifungen in Längen- und Breitenrichtung auf die Biegeeigenschaften des Prüfkörpers untersucht.

**Abstract:** This publication presents a software tool that acts as an automated preprocessor based on the Finite-Element-Analysis software Z88Aurora. This tool enables the simulation of four-point bending tests according to ASTM C393-00. The test specimen is set up as a standardized sandwich structure that features resin-filled cuts in the core material. To further demonstrate the capabilities of the software tool, a variation of parameters is executed to explore the influence of these cuts on the specimen's bending stiffness by varying the number of cuts along the length and width of the specimen.

**Stichwörter:** Finite-Elemente-Analyse, Leichtbau, Sandwichkonstruktionen, Z88Aurora, Z88RS

**Keywords:** Finite-Element-Analysis, lightweight construction, sandwich material, Z88Aurora, Z88RS

## 1 Einleitung

Erneuerbare Energien zur Schonung der Umwelt und zur Schaffung einer Nachhaltigkeit schöpfen aus dem wissenschaftlichen Stand aller Bereiche der modernen Technik. Weniger modern aber effizient ist die Nutzung von Windenergie zur Erzeugung von Strom. Sie ist neben der Solarenergie eine der Säulen bei der „grünen“ Revolution. Die Weiterentwicklungen im Windenergiebereich sind geprägt vom Leichtbau [1]. Durch die Reduzierung von Gewicht erreicht man eine Erhöhung der Nutzleistung indem größere

Turmhöhen und damit einhergehend größere Windkraftflügel zum Einsatz kommen. Die Windkraftflügel werden in Sandwichbauweise gefertigt. Dieses Sandwichmaterial besteht aus zwei Deckschichten und einem Balsaholz- oder Schaumkern. Die Deckschichten bestehen wiederum aus einem Lagenaufbau aus Wirrfasermatten und Gewebelagen aus Glasfasern. Dabei nehmen die Deckschichten die Zug- und Druckspannungen auf, während die Kernschicht primär auf Schub belastet wird. Der trockene Sandwichaufbau wird dann mit einem Epoxidharz infiltriert. Werden vor der Infiltration Schnitte durch Sägen oder Messer in den Schaumkern eingebracht, werden diese bei der Infiltration mit Harz gefüllt und bilden stabile Versteifungen aus, die die Biegesteifigkeit des Sandwichaufbaus beeinflussen [2], [3].

Dieser Einfluss soll nun durch die Entwicklung eines automatisierten Präprozessors, genannt Z88SandwichSIM, aufbauend auf der Finite-Elemente-Analyse (FEA) Software Z88Aurora untersucht werden. Im Folgenden werden mittels einer Parameterstudie die Anzahl der Versteifungen in Längen- und Breitenrichtung variiert und anhand eines an [4] angelehnten Vierpunkt-Biegeversuchs die Steifigkeit ausgewertet.

## **2 Vorteile einer graphischen Benutzeroberfläche**

Der in [2] vorgestellte Strukturgenerator wird mittels Konsole oder durch Doppelklick ausgeführt. Als Eingabedaten dienen Informationen innerhalb der Textdatei *Input.txt*. Geometrie-, Vernetzungs- und Materialparameter sind manuell zu editieren. Die Benutzerfreundlichkeit ist dadurch sehr eingeschränkt, was vor Allem bei der Erstellung mehrerer Konfigurationen ineffektiv ist. Mit der graphischen Benutzeroberfläche des Strukturgenerators, siehe Abbildung 1, sind alle wesentlichen Eingabewerte übersichtlich angeordnet und leicht veränderbar.

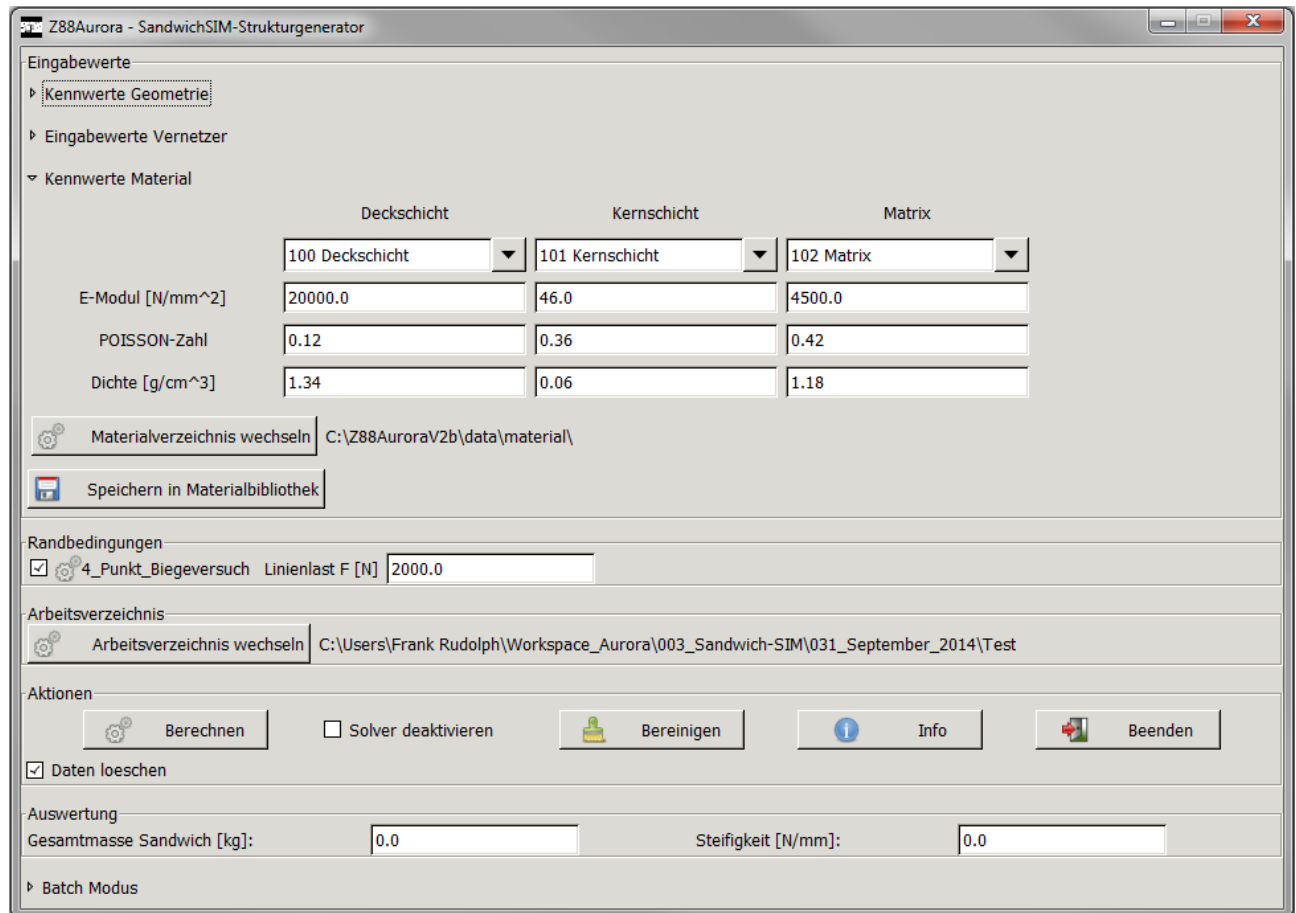


Abbildung 1: Graphische Benutzeroberfläche von Z88SandwichSIM

Vorteile sind u.a. die leichte Editierbarkeit der Eingabewerte, zusätzliche graphische Informationen und das direkte Ansteuern des *FE*-Solvers *Z88RS* nach [5]. Diente der Strukturgenerator als reines Werkzeug für ein erleichtertes *Preprocessing*, sind Masse und Steifigkeit, der eingestellten Konfiguration, per Mausklick ermittelbar.

### 3 Softwaretechnische Umsetzung der automatisierten Parastudien

Die Integration des *FE*-Solvers *Z88RS* innerhalb der Benutzeroberfläche bietet vielmehr den Vorteil der Automatisierbarkeit für Parameterstudien. Dem Flussdiagramm in Abbildung 2 entnehmend, können mehrere Berechnungen sequentiell abgearbeitet werden. Die benötigte Variation der Kennwerte gibt der Benutzer vor.

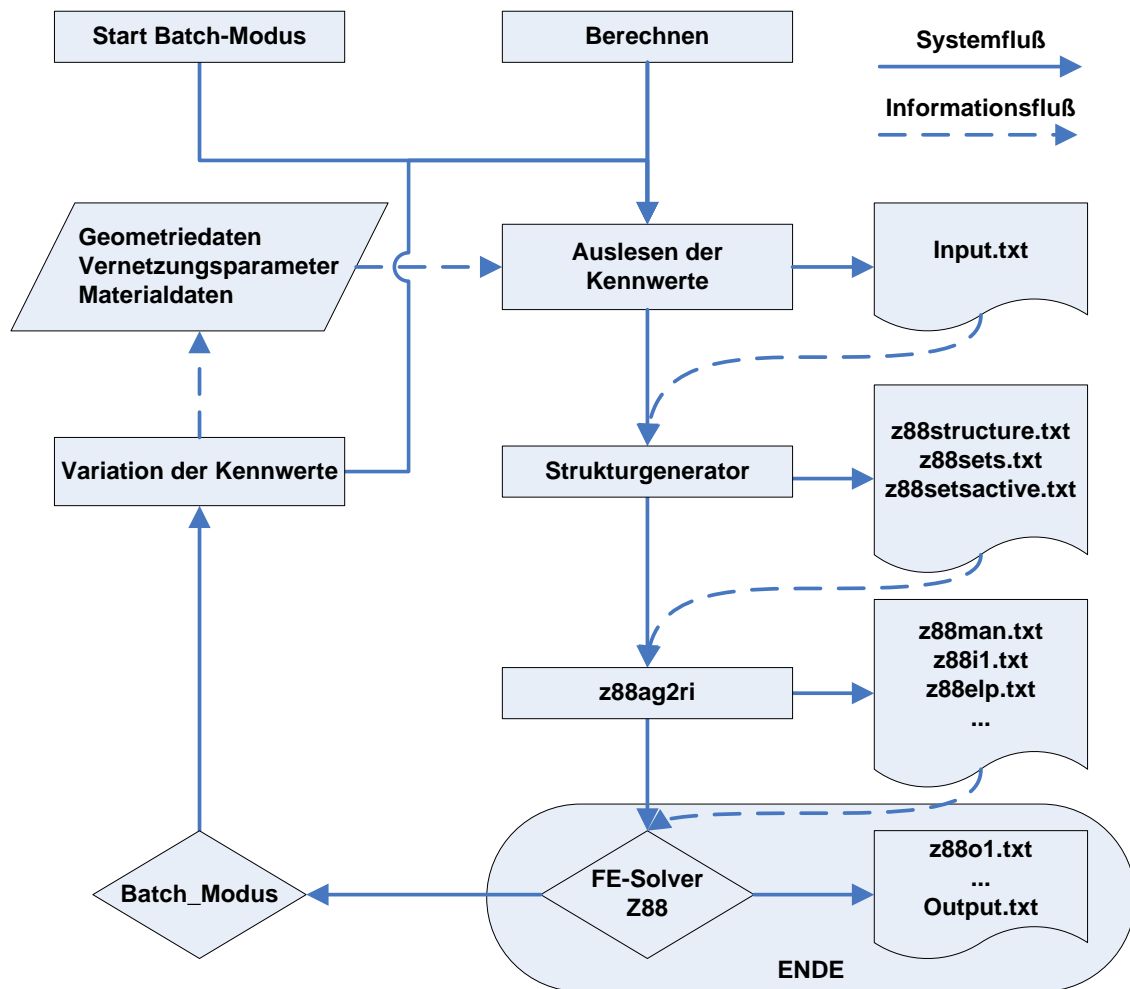


Abbildung 2: Flussdiagramm der Benutzeroberfläche

Möchte man die Anzahl der Versteifungen in Breitenrichtung von 1 bis 10 und die in Längenrichtung von 1 bis 20 variieren, sind 200 Berechnungen durch die Software automatisiert handhabbar. Das zeitliche ineffiziente Preprocessing wird auf ein Minimum reduziert, die Benutzerfreundlichkeit wiederum gesteigert.

Seitens der verwendeten Software kam die imperative Programmiersprache C zum Einsatz. Die Erstellung der graphischen Benutzeroberfläche erfolgte unter Gebrauch der freien Komponentenbibliothek *GTK+* [6], [7], [8]. Die Eingabewerte sind innerhalb sogenannter *Expander* angeordnet. Dies bietet den Vorteil unwesentliche Eingabefelder auszublenzen. Beim Starten der Software sind die insgesamt 21 Eingabefelder ausgeblendet, was dem Benutzer die Orientierung erleichtert. Mit der vorgegebenen Grundeinstellung besteht die Möglichkeit, ohne weitere Editierung von Eingabewerte, eine komplette Simulation inklusive Auswertung durchzuführen.



Nach der Initialisierung der Simulation werden sämtliche Eingabefelder ausgelesen und als Textdatei, im angegebenen Arbeitsordner, gespeichert. Der Strukturgenerator liest die Daten ein, verarbeitet Sie zur Sandwichstruktur mit Randbedingungen für den Vierpunkt-Biegeversuch und hinterlegt die Daten, kompatibel für das freie *FE*-Programm *Z88AuroraV2*. Der implementierte *FE*-Solver *Z88RS* lässt sich in *Z88SandwichSIM* deaktivieren. Somit besteht die Möglichkeit für den Benutzer die generierte Struktur in *Z88AuroraV2* einzulesen und die Schritte *Solving* und *Preprocessing* manuell abzuschließen. Ziel von *Z88SandwichSIM* ist jedoch nicht die Auslagerung der letztgenannten Schritte für die komplette Simulation.

Die hinterlegte virtuelle Sandwichstruktur wird mittels *z88ag2ri* für den Solver *Z88RS* konvertiert. Dieser benötigt zum Aufruf eine ursprünglichere Datenstruktur. Die Informationen u.a. für Geometrie-, Material- und Elementparameter sowie Integrationsordnung stehend abschließend in Textdateien zur Verfügung. Nach erfolgreichem Solving stehen Informationen u.a. zu Verschiebungen und Spannungen in den *z88oX.txt*-Dateien zur weiteren Verwendung bereit. Für den Benutzer, zur leichteren Auswertung, sind Masse und Steifigkeit der Sandwichkonfiguration in der *Output.txt* hinterlegt. Die Werte erscheinen ebenfalls in der Benutzeroberfläche. Seit Initialisierung der Simulation ist seitens des Benutzers keine weitere Handhabung von Nöten.

Die automatisierten Parameterstudien, hier Batch-Modus genannt, benötigen lediglich eine Variation der gewünschten Parameter. Dies wurde mittels Schleifen in C realisiert. Dafür werden alle benötigten Daten in nachvollziehbare Unterordner gespeichert, konvertiert, die eigentliche Simulation gestartet und ausgewertet. Zur besseren Auswertung der vielzähligen *Output.txt*-Dateien erfolgt abschließend eine Zusammenfassung aller Konfigurationen als *Ergebnisse.txt*. Externe Programme zur Datenaufbereitung finden final, manuell gesteuert durch den Benutzer, Verwendung. Die Möglichkeit der automatisierten graphischen Auswertung, beispielsweise mit *gnuplot*, besteht [9].

#### **4 Parameterstudien der Versteifungen mit Z88SandwichSIM**

Für die Durchführung der Parameterstudie wurden vom automatisierten Preprocessing des Strukturgenerators die Anzahl der Versteifungen in Längen- und Breitenrichtung variiert und die Randbedingungen für die *FEA* entsprechend dem Vierpunkt-Biegeversuch nach *ASTM C393-00* [4] festgelegt. Der Nomenklatur der Modellbildung folgend zeigt

Abbildung 3 eine Probe mit 19 Versteifungen in Längen- (L19) und 3 Versteifungen in Breitenrichtung (B3). Bei den folgenden Untersuchungen wurde als Kernmaterial ausschließlich Polyvinylchlorid (PVC)-Schaum untersucht, da dieser im Vergleich zu Polyethylenterephthalat *PET*-Schaum isotrope Materialeigenschaften aufweist [3].

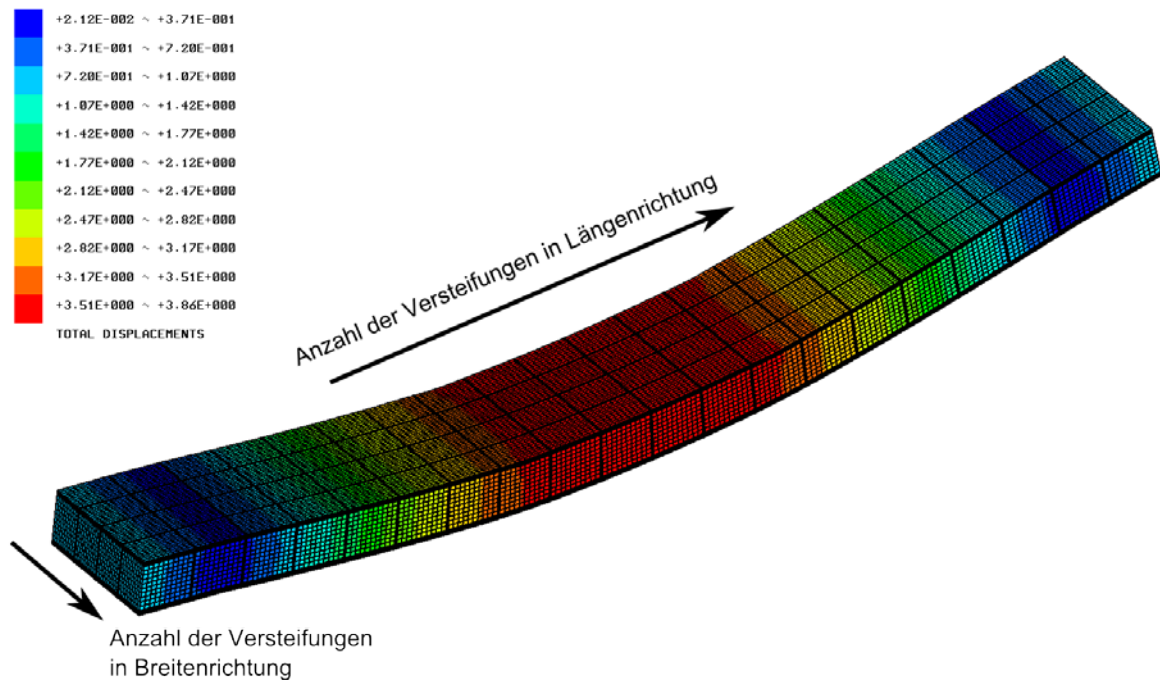


Abbildung 3: Prüfkörper und Definition der Richtungen

Die Auswertung erfolgte anhand der Steifigkeit  $C$ , die den Quotienten aus der Prüfkraft  $F$  und der maximalen Verschiebung  $u_{max}$  der Probe darstellt. Um eine Aussage über das Leichtbaupotential einer Variante treffen zu können, wurde mit der Gesamtmasse  $m$  des Sandwichkörpers die spezifische Steifigkeit  $C_{spez}$  nach (1) eingeführt.

$$C = \frac{F}{u_{max}}, \quad C_{spez} = \frac{C}{m} \quad (1)$$

Die beiden Versteifungsgeometrien *Saw Cut* und *Knife Cut* unterschieden sich durch ihre jeweilige Schnittbreite  $s$  (s. Abbildung 4). Der *Saw Cut* besitzt eine Schnittbreite  $s = 1,2 \text{ mm}$ , für den *Knife Cut* gilt  $s = 0,2 \text{ mm}$ . Aus fertigungstechnischen Gründen wird bei beiden Varianten ein Steg von 1 mm belassen.

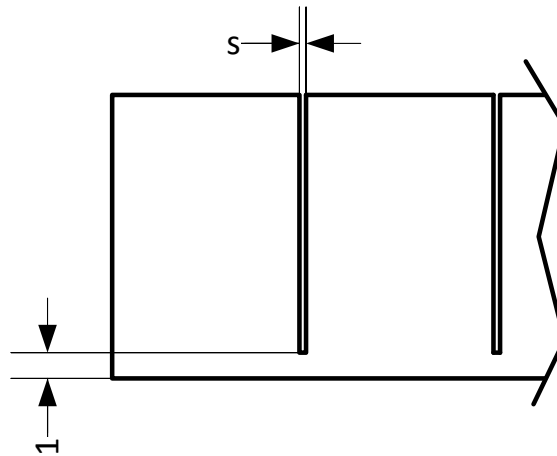


Abbildung 4: Schnittgeometrien im Schaumkern

In Abbildung 5 sind die (spezifischen) Steifigkeitswerte für eine *PVC Saw Cut* Probe mit 3 und 6 Versteifungen in Längsrichtung (L3 und L6) in Abhängigkeit von der Anzahl der Versteifungen in Breitenrichtung aufgetragen.

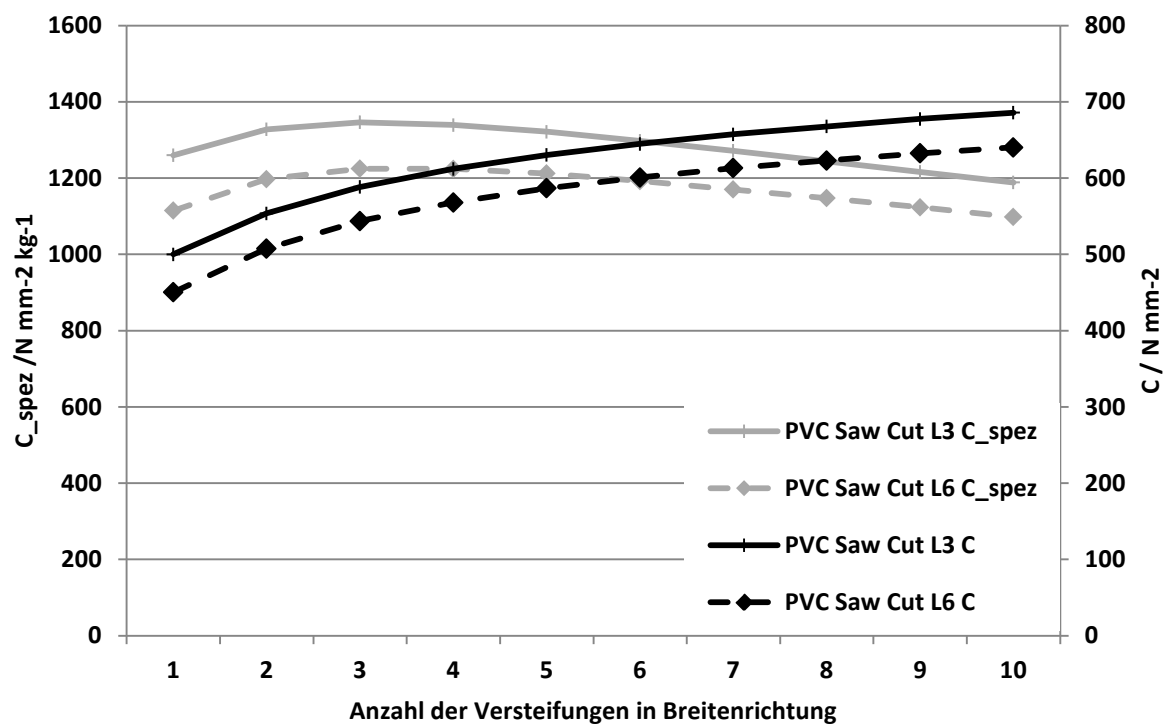


Abbildung 5: Einfluss der Versteifungen in Breitenrichtung (Saw Cut)

Es zeigt sich, dass die Steifigkeit einer Probe mit zunehmender Anzahl der Versteifungen zunimmt, was auf Grund der Orientierung der Versteifungen im Prüfkörper

zu erwarten war. Die höhere Dichte des Matrixmaterials führt jedoch zu einer schwereren Probe, weshalb die optimale spezifische Steifigkeit bei 3 Versteifungen erreicht ist. Dieses Optimum gilt für beide Proben, unabhängig von der Steganzahl in Längsrichtung. Zusätzlich ist offensichtlich, dass sich die höhere Anzahl von Versteifungen in Längsrichtung negativ auf die Biegesteifigkeit einer Probe auswirkt. Die Verdoppelung der Steganzahl von 3 auf 6 führt lediglich zu einem Massezuwachs der Probe und somit zu einer Senkung der spezifischen Biegesteifigkeit.

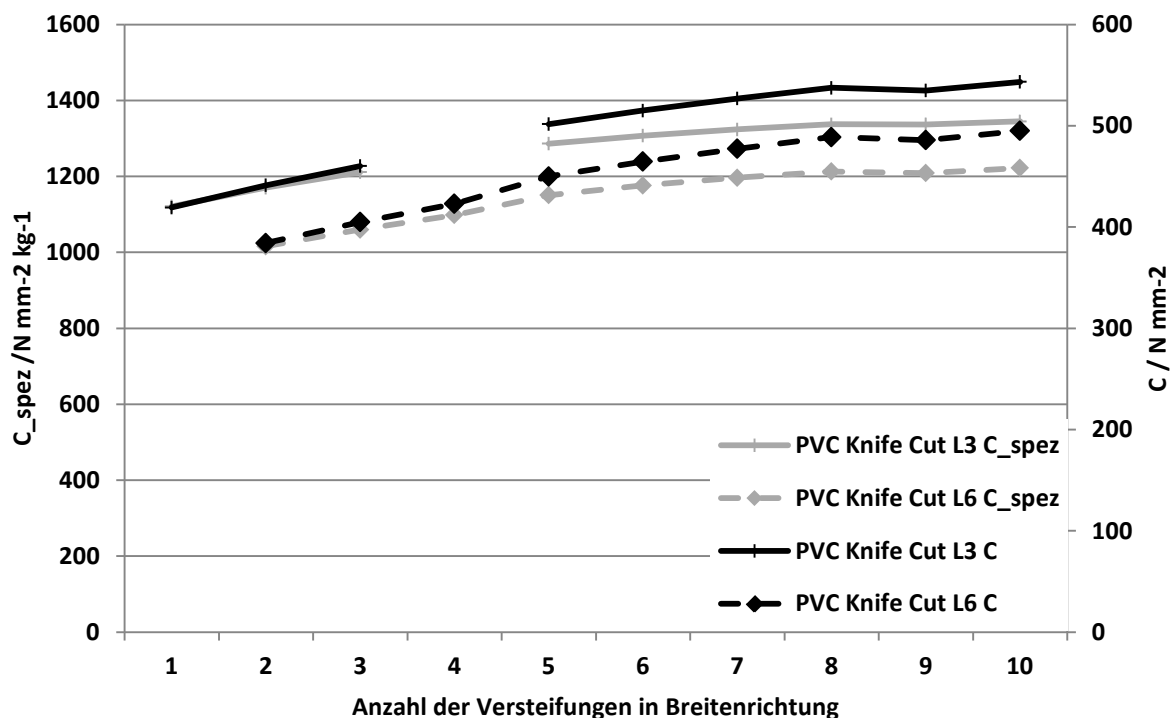


Abbildung 6: Einfluss der Versteifungen in Breitenrichtung (*Knife Cut*)

Abbildung 6 zeigt die gleiche Grafik für die Variante *Knife Cut*. Die teilweise fehlenden Werte für die Varianten mit 1 bzw. 4 Versteifungen in Breitenrichtung sind durch eine fehlerhafte Vernetzung zu erklären, die eine erfolgreiche Berechnung der jeweiligen Variante verhinderte. Für diese ersten Untersuchungen ist dies jedoch nicht entscheidend, da dennoch ein ähnlicher Trend wie bei der Variante *Saw Cut* festgestellt werden kann: Die Steifigkeit  $C$  der Proben steigt mit zunehmender Steganzahl in Breitenrichtung. Abweichend von Abbildung 5 wird hier jedoch kein Maximum der spezifischen Steifigkeit  $C_{spez}$  erreicht. Rein rechnerisch liegt dies bei der sechsfachen Anzahl von Versteifungen wie bei der Variante *Saw Cut*, da diese sechsmal so breit wie die Variante *Knife Cut* ist

(vgl. Abbildung 4). Obwohl diese Lösung von dem Standpunkt der *FEA* aus betrachtet theoretisch möglich ist, ist diese fertigungstechnisch kaum umsetzen, da diese auf einer Probenbreite von 50 mm 18(!) Schnitte erfordert. Darüber hinaus würde diese hohe Anzahl von Schnitten einen überhöhten Massezuwachs der Probe hervorrufen, da über die größere Schnittfläche zum restlichen Kernmaterial übermäßig viel Harz in die Poren des Schaums eindringen würde.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Fertigung der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Sandwichstrukturen und die Durchführung des vorgestellten Vierpunkt-Biegeversuchs stellen einen hohen Zeit- und Kostenaufwand dar. Durch die Entwicklung des Strukturgenerators *Z88SandwichSIM* wurde ein voll automatisiertes *Preprocessing* basierend auf der *FEA*-Software *Z88Aurora* vorgestellt, dass die für den Biegeversuch notwendige *FE*-Geometrie inklusive der Randbedingungen erzeugt, berechnet sowie auswertet und darüber hinaus die Variation beliebiger struktureller Parameter zulässt. Diese Parametervariationen können in einem Batch-Modus vollkommen autonom durchgeführt werden.

Am Beispiel von in das Kernmaterial eingebrachter Harzstege wurde eine Parameterstudie durchgeführt, die je nach deren Orientierung und Anzahl einen positiven oder negativen Einfluss auf die Biegeeigenschaften des simulierten Prüfkörpers besitzen. Für die Variante *Saw Cut* wurde in dem oben behandelten Beispiel eine optimale massebezogene Biegesteifigkeit durch drei Versteifungsstrukturen in Breitenrichtung erreicht.

Untersuchungen der Ergebnisqualität von *Z88SandwichSIM* hinsichtlich der Vernetzungsgüte bzw. der Netzfeinheit bleiben abzuwarten. Die vorliegenden Tendenzen zur Verbesserung des Leichtbaupotentials sind jedoch nachvollziehbar und können als Ausgangspunkt für praktische Versuche, auch zur Validierung der Simulationsergebnisse, verwendet werden.

## Literatur

- [1] Hau, E.: *Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Eigenschaften, Wirtschaftlichkeit*. 4. Auflage. Berlin: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-72151-2
- [2] Rudolph, F.; Neidnicht, M.; Rieg, F.: *Konzeption und Realisierung eines Strukturgenerators zur Generierung von Sandwichstrukturen mit Versteifungen für die Implementierung in der Finiten Elemente Analyse*. 11. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. Aachen: Shaker-Verlag, 2013. ISBN: 978-3-8440-2182-0
- [3] Fathi, A.; Wolff-Fabris, F.; Altstädt, V.; Gätzi, R.: *An investigation on the flexural properties of balsa and polymer foam core sandwich structures: Influence of core type and contour finishing options*. Journal of Sandwich Structures and Materials 2013; 15(5): 487-508.
- [4] ASTM C393-00. *Standard test method for flexural properties of sandwich constructions*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2000.
- [5] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.; Alber-Laukant, B.: *Finite Elemente Analyse für Ingenieure*. 4. Auflage. München, Wien: Carl-Hanser-Verlag, 2012. – ISBN: 978-3-446-42776-1
- [6] Wolf, J.: *C von A bis Z*. 2. Auflage. Bonn: Galileo Press, 2006. ISBN: 978-3-89842-643-5
- [7] Krause, A.: *Foundations of GTK+ Development*. New York: Springer-Verlag, 2007. ISBN: 978-1-59059-793-4
- [8] Warkus, M.: *Das GTK+/GNOME-Entwicklerhandbuch*. Heidelberg: dpunkt-Verlag, 2008. ISBN: 978-3-89864-512-6
- [9] Homepage: [www.gnuplot.info](http://www.gnuplot.info). Aufgerufen: 15. September 2014

# **Integration der geometrischen Produktspezifikation (GPS) in den methodischen Konstruktionsprozess am Beispiel eines Prüfstandes**

**Dipl.-Ing. Marko Ebermann, Prof. Dr.-Ing. E. Leidich**

Professur Konstruktionslehre, Technische Universität Chemnitz

Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz

E-Mail: marko.ebermann@mb.tu-chemnitz.de; Internet: <http://www.tu-chemnitz.de/mb/KL>

**Inhalt:** Obwohl der Konstruktionsprozess inzwischen wissenschaftlich sehr gut erforscht ist und die funktionsorientierte Betrachtungsweise in nahezu allen Hochschulen gelehrt wird, sind besonders in der Montage oder während der Inbetriebnahme nicht selten Nacharbeiten zur vollen Funktionserfüllung erforderlich. Die Gründe dafür sind mehrschichtig und reichen von der fehlenden Simulation im Entwicklungsprozess über eingesparte Funktionsmodelle bis hin zur nicht eindeutigen Tolerierung der Fertigungsteile.

Damit die Funktion gewährleistet werden kann, müssen die geometrische Gestalt, der strukturierte Aufbau und die Materialbeschaffenheit eindeutig beschrieben sein. Zur Sicherstellung der internationalen Verständigung sind Normen und Richtlinien unerlässlich. Für die geometrische Beschreibung steht dafür das umfassende System der geometrischen Produktspezifikation (GPS) zur Verfügung [1]. Der effiziente Einsatz der GPS ist jedoch nur durch systematische Anwendung möglich, da dem Konstrukteur die enormen Umfänge der GPS in der Regel nicht vollständig bekannt sein werden. Erste Ansätze einer solchen Systematik zur Integration des GPS-Systems in den methodischen Konstruktionsprozess [2] ab der frühen Entwurfsphase wurden von den Autoren nach funktionalen Aspekten bereits in [3] vorgestellt. Demnach ist die geometrische Spezifikation, ausgehend von der Funktion und den damit verbundenen Systemtoleranzen, ab dem Grobentwurf zu definieren und während des Konstruktionsprozesses zu aktualisieren. Diese werden begleitend zum Gestaltungsprozess am CAD-Modell und ausgehend von Flächenkontaktschnittstellen der modularen Systemstruktur verfeinert, so dass mit dem vollendeten Gesamtentwurf die Funktion vollständig spezifiziert ist.

Im Beitrag wird die methodische Umsetzung der funktionalen Tolerierung (Toleranzsynthese) am Beispiel einer Reibkorrosionsprüfvorrichtung vorgestellt. Es wird dargelegt, wie sich die Tolerierung auf den Montageprozess und die Inbetriebnahme auswirken und ob die genannte Methode für weitere Konstruktionen Anwendung finden kann. Bei der Erstellung der geometrischen Spezifikation für die Vorrichtung ist besonderer Wert auf die methodische und funktionsanalytische Herleitung der Toleranzen gelegt worden. Auf Basis arithmetischer Toleranzanalysen in den konstruktionsmethodischen Schleifen kann die funktionsorientierte Toleranzsynthese weiter verfeinert werden. Ausgangspunkt für die dimensionale Tolerierung ist ein ähnliches, bereits existierendes Prüfstandkonzept. Die Darstellung der fertigungs- und messtechnischen Ausführungen nach der funktional ausgearbeiteten Spezifikation ist ebenfalls Bestandteil des Beitrages und zeigt

*Schwerpunkte, die bei der Transformation von funktions- in fertigungs- und mess-orientierter Tolerierung Beachtung finden müssen.*

*Die frühe Berücksichtigung der geometrischen Produktspezifikation wird so bei einem effizienten Arbeitsablauf zu einer Verringerung der Konstruktionsschleifen führen und damit zur Verkürzung des Konstruktionsprozesses beitragen.*

**Abstract:** *Although in recent years the construction process has been extensively researched and a function-oriented approach is taught at most universities, rework during the assembly process and during operation seems to be still necessary to reach full capacity. The reasons for that are manifold and range from missing simulations during the development process and absent functional models to insufficient tolerances of manufactured parts.*

*To guarantee operation, the geometric shape, the structured composition and the material consistence have to be precisely determined. On an international level, norms and guidelines are indispensable. A complex system for the geometric description, which sets these international guidelines, is the geometrical product specification (GPS) [1]. The efficient usage of GPS relies on its systematic application because it is almost impossible for a constructing engineer to capture the immense complexity of GPS. First approaches for the integration of the GPS system into the early stages of the methodic construction process according to functional aspects were introduced in [3] by the authors. Therefore, the geometrical specification based on the function and its associated system tolerance needs to be defined at the early stages of the preliminary draft and updated during the construction phase. Based on the surface contact interface of the modular structure of the system, system tolerances are adapted parallel to the design process of the CAD model which renders it possible that the function is fully specified with the final stages of the draft.*

*This contribution illustrates the methodic realization of functional tolerance (tolerance synthesis) using a fretting corrosion test device as an example. The paper analyzes how tolerances influence the assembly process respectively the initial operation and whether the above mentioned method can be applied to further constructions. During the development of the geometrical specification for the test device, the focus lay on the methodical and functional analytic derivation of tolerances. The function-oriented tolerance synthesis can be improved if arithmetic tolerance analyses of constructional methodological loops are taken as a basis. A starting point for the dimensional tolerance is a similar already existing concept of a testing device. Another component of this paper is the presentation of the manufacturing and measuring execution according to the functional specification. It also identifies key aspects which are important for the transformation from functional to manufactured and measure-oriented tolerances.*

**Stichwörter:** *geometrische, funktionale und methodische Tolerierung; Geometrische Produktspezifikation; methodisches Konstruieren*

**Keywords:** *geometrical, functional and methodical tolerancing; Geometric product specification; systematic embodiment design*



## **1 Einleitung**

Mit zunehmend komplexer werdenden funktionalen Anforderungen an technische Produkte, steigt auch die Komplexität der zu tolerierenden Geometrie einzelner Komponenten. Instrumente für die Definition von Abweichungen zwischen Nenn- und Realgeometrie gibt das umfassende Regelwerk der geometrischen Produktspezifikation (GPS) [3] dem Konstrukteur vor. Zwar beschreibt die GPS die geometrische Tolerierung und fordert eine funktionale Spezifikation, allerdings schlägt sie keine Systematik vor, wie die funktionsorientierte Tolerierung im Konstruktionsprozess umgesetzt werden soll. Der zunächst theoretische Ansatz von [5] beschreibt eine Möglichkeit der systematischen Tolerierung ab dem Beginn der frühen Entwurfsphase des Konstruktionsprozesses und wie synchron zur Entwicklung eines Bauteils toleriert werden kann. Ausgangspunkt ist immer die Funktion und die Strukturierung von Funktionsflächen, damit ein funktionales Bezugssystem, ausgehend von Baugruppenfunktionen, entstehen kann.

Dieser Beitrag zeigt, basierend auf der methodischen Vorgehensweise nach VDI 2221, die praktische Anwendung der Systematik an einem realen Prüfstand.

## **2 Vorbetrachtungen und Funktionsweise der Prüfvorrichtung**

### **2.1 Systematik zur funktionsorientierten Tolerierung von Neu- und Änderungskonstruktionen**

Das umfassende Regelwerk der GPS-Normen fordert unter anderem den Grundsatz der Funktionalität innerhalb funktionaler Grenzen [6] eines technischen Systems. Für die Tolerierung von Werkstücken bedeutet dies die Überprüfung der Funktion durch die Summe aller in der Produktdokumentation geforderten Spezifikationen. Ist die Funktion eindeutig definierbar, so können auch die Spezifikationen vollständig ausgeführt werden.

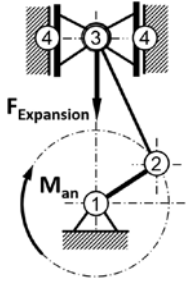
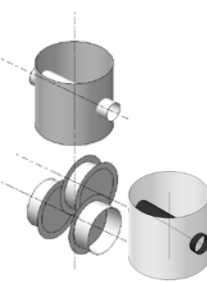
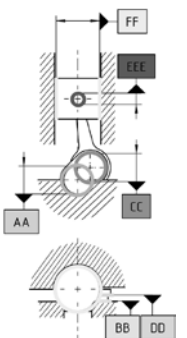
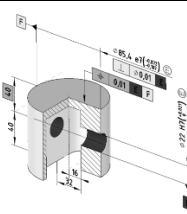
Die in [5] dargestellte Systematik zur Tolerierung von Geometrieabweichungen, analog zum methodischen Konstruktionsprozess ab der frühen Entwurfsphase, geht unmittelbar auf die Funktion und Wechselwirkung von Flächen in den Wirkstellen eines technischen Systems zurück.

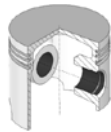
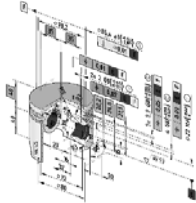
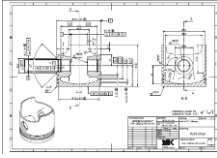
Als Funktion werden im Folgenden nicht nur die Erfüllung von Anforderungen im Sinne des Objektes verstanden, sondern auch funktionale Schnittstellen jeder Art zwischen den Einzelteilen, da beispielsweise die Montage von Komponenten ebenfalls eine Unterfunktion im Produktsystem darstellt [1]. Zwar entsprechen diese Funktionen nicht der eigentlichen Produktfunktion, sind aber für deren Realisierung unabdingbar.

Tabelle 1 zeigt die Systematik zur entwurfsbegleitenden Tolerierung im Überblick am Beispiel eines Kurbeltriebs und des Einzelteils Hubkolben. Zunächst werden die Funktionen des Produktkonzeptes durch eine Funktionsanalyse erfasst und anschließend nach Priorität hierarchisch wie in Tabelle 1/Schritt 1 zu einer Funktionshierarchie geordnet. Im Baugruppenmodus des CAD-Systems werden die abgeleiteten und vollständigen Nenn-Geometrieelemente aus dem Produktkonzept heraus modelliert. Diese können einfache Größenmaßelemente, wie Zylindermantel oder zwei parallele Ebenen, oder einfache Nicht-Größenmaßelemente wie Ebenen, Achsen, Kurven oder Freiformflächen sein. Tabelle 1 zeigt unter Schritt 2 die Flächenmodellierung vereinfacht nur am Einzelteil. Basis dafür sind erste überschlägige Berechnungen, Anschlussvorgaben, Bauraumvorgaben und andere durch die Anforderungsliste vorgegebene Kriterien. Den Geometrieelementen werden Bezugsbezeichnungen (Tabelle 1/Schritt 3) entsprechend der im Schritt 1 erstellten Funktionshierarchie und geometrische Beziehungen, sowie deren Toleranzen, zugewiesen. Diese Bezugsbezeichnungen und tolerierten Beziehungen werden auf die Einzelteile projiziert und die Toleranzen aus der Baugruppe auf die entsprechenden Einzelteile gemäß Schritt 4 in Tabelle 1 aufgeteilt. Nach einer Toleranzanalyse ist häufig eine Neuverteilung der Toleranzwerte auf die Einzelteile oder eine Erweiterung der Toleranzzone im Baugruppenkontext nötig, wenn absehbar ist, dass die Umsetzung der Nenngeometrie in die Realität nach den geforderten Angaben nicht oder nur unter sehr hohem Kosteneinsatz möglich ist. Im weiteren Entwurfsverlauf ist es nicht selten, dass Einzelteile um funktionsbestimmende Geometrieelemente erweitert werden, so dass eine Erweiterung der Funktionshierarchie und des Toleranzsystems nötig ist, bis die Feingestaltung entsprechend Tabelle 1 abgeschlossen ist.

Die Schleife zwischen Toleranzanalyse und –Synthese kann sich je nach Verlauf des Entwurfsprozesses beliebig oft wiederholen, da zu Beginn der Entwurfsphase zwar die Funktionsflächen bekannt sind, jedoch die volumeneinschließende Hüllgeometrie der Einzelteile, sowie deren Fertigungsverfahren noch unbekannt sind und einen erheblichen Einfluss auf die Tolerierung von Geometrieabweichungen nehmen können.

Tabelle 1: Darstellung der Teilschritte bei der Tolerierung im Entwurfsprozess am Beispiel eines Schubkurbeltriebes/Hubkolbens nach [5]

| Methodische Reihenfolge nach VDI 2221 | Schritt im Entwurfsprozess  | Grafische Darstellung am Beispiel Schubkurbel                                       | Umsetzung am Beispiel Schubkurbel/Kolben   |
|---------------------------------------|---|---|--|
| Grobgestaltung                        | 1. Funktionsanalyse ausgehend von der Hauptfunktion des technischen Systems, hier: Rotation der Kurbelwelle                   |    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Aufnahme der Kurbel im Gestell als Drehgelenk</li> <li>2 Aufnahme der Koppel auf der Kurbel als Drehgelenk</li> <li>3 Aufnahme der Stabkräfte der Koppel am Kolben als Zylinderlager</li> <li>4 Führungs- und Dichtfunktion durch Flächenpaarung zwischen Schieber und Gestell</li> </ol> |
|                                       | 2. Modellierung der Funktionsflächen entsprechend dem ersten Schritt aus der Skizze und erneute Analyse am Einzelteil         |   | <p>Modellierung der Flächen von Kurbelwellenlager, Pleuellager, Kolbenbolzenlager und Zylinder-/Kolbenmantelfläche</p> <p>Anschließend Übertragung betreffender Flächen in das Einzelteil. Hier: Hubkolben</p>   |
|                                       | 3. Überführung der Funktionen in ein geordnetes Bezugssystem – Tolerierung der geometrischen Bedingungen zwischen den Bezügen |  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1 A – Rotation der Kurbelwelle</li> <li>B – Axiale Sicherung der Kurbelwelle</li> <li>2 C – Rotation Pleuel in der Kurbelwelle</li> <li>D – Axiale Sicherung des Pleuel</li> <li>3 E – Aufnahme Kolben über Kolbenbolzen</li> <li>4 F – Translation Kolben und Dichtfunktion</li> </ol>     |
|                                       | 4. Ableitung der Einzelteiltoleranzen aus den Baugruppentoleranzen und dem gewünschten Schließmaß                             |  | Statistische bzw. arithmetische Toleranzbetrachtung zur Aufteilung der Toleranzen auf die Einzelteile (wird in diesem Beitrag näher erläutert)   |

|                |  |   |   |
|----------------|--|---|---|
| Feingestaltung | 5. Ausgestaltung nach Fertigungsverfahren und Funktionsoptimierung       |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimierung der Dichtfunktion durch Ölabbstreif- und Kolbenringnuten</li> <li>• Guss-/Schmiedegerechte Gestaltung</li> <li>• Axiale Sicherung des Kolbenbolzens durch Sicherungsringe → Nuten</li> </ul> |
|                | 6. Tolerierung der untergeordneten Funktionsflächen                      |  | Maß-, Form- und Lagetolerierung für die ergänzten Geometrieelemente im 3D-Modell  |
| Ausarbeiten    | 7. Überführung in eine technische Zeichnung für die Produktdokumentation |  | Projektion des vollständig spezifizierten 3D-Modells in die zweite Dimension  |

## 2.2 Definition von Funktion und Versuchsanordnung des Beispielprüfstandes

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens bezüglich des Einflusses von Reibkorrosion auf dynamisch schwellend belastete Bauteile, wurde ein Prüfstandkonzept entwickelt, welches entsprechende Aussagen zulassen soll.

Das Lastenheft beschreibt einen schwellend zugbeanspruchten und doppelt taillierten Probenkörper, der eine dynamische Dehnung durch einen eigenerregten Pulsator-Prüfstand mit 50 Hz erfährt. Zwei gegensätzlich wirkende Reibklötzen beanspruchen die Probe zudem mit einer statischen Last (Abbildung 1), die tribologische Effekte zur Folge hat, da der Zugstab lokal aufgrund der Dehnung eine dynamische Relativbewegung mit einem Schlupf von bis zu 50 µm erfährt.

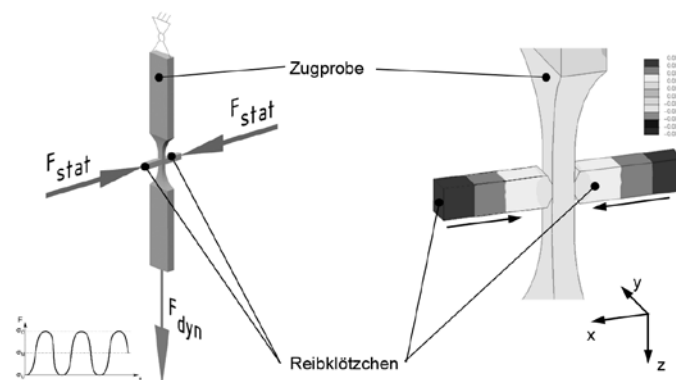


Abbildung 1: links: prinzipielle Probenbelastung durch Reibklötzen, rechts: Reibklötzenverschiebung durch Querkontraktion bei Zugbeanspruchung und Stauchung der Klötzen durch Normalkraft

Für die Funktion der Prüfvorrichtung ist weiterhin von Bedeutung, dass die Querkontraktion der Probe zu einer Querschnittsreduktion führt, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Die Reibklötzchen müssen entsprechend in Kraftwirkungsrichtung verschiebbar sein, um eine Verfälschung der Reibkraft auszuschließen.

Die Versuchsanordnung kann nur reproduzierbare Ergebnisse liefern, wenn sichergestellt ist, dass die Flächenpressung zwischen Probe und Reibklötzchen gleichmäßig verteilt ist. Entsprechend ist die Hauptfunktion der zu entwickelnden Prüfvorrichtung die Realisierung einer gleichmäßigen Druckverteilung der Flächenpaarungen zwischen den Reibklötzchen und der Zugprobe. Weiterhin soll die Vorrichtung die gegensätzlich wirkende Normalkraft aufbringen und eine feste Einspannung der Reibklötzchen in Zug- und Querrichtung des Probenkörpers sicherstellen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde bereits ein vollständiger Prüfstand zu dieser Versuchsanordnung konstruiert und gefertigt, dessen eigentliche Prüfvorrichtung weiter zu optimieren ist, um noch reproduzierbarere Ergebnisse erhalten zu können.

## 2.3 Der bestehende Prüfstand

Abbildung 2 zeigt den vollständigen Prüfstand mit den Einzelsystemgrenzen. Die Schnittstelle zwischen Prüfstand und Prüfvorrichtungsmodul bilden die Berührungsflächen zu den Piezoaktoren, welche die Aufgabe des Korrigierens der Relativbewegung zwischen Klötzchen und Probe übernehmen. Der Bauraum wird durch die Spannelemente der Zugprobe begrenzt, um das Austauschen der Zugprobe kurzfristig zu ermöglichen.

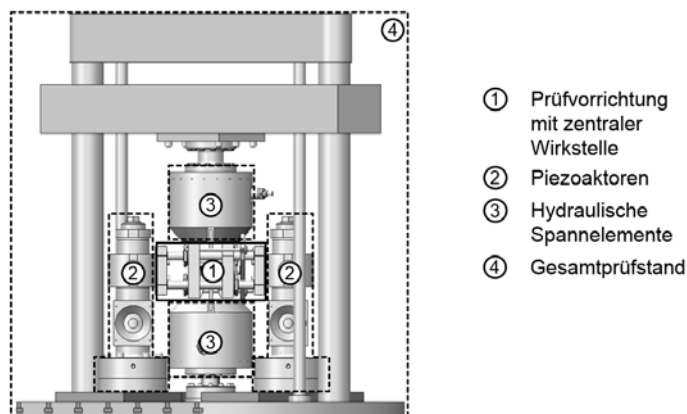


Abbildung 2: Reibklötzchenprüfstand mit Einzelsystemen

## 2.4 Konzept der Prüfvorrichtung

Bevor die Systematik der Tolerierung im Entwurfsprozess am Beispiel aufgezeigt werden kann, soll zunächst das Konzept der Prüfvorrichtung beschrieben werden.

### Überarbeitete Prüfvorrichtung

Bei der in Abbildung 3 dargestellten Prüfvorrichtung handelt es sich um die bereits überarbeitete Einheit, auf die im Beitrag noch näher eingegangen wird. Diese besteht aus zwei äußeren Aufnahmeplatten, die über vier zylindrische Führungsstangen durch Pressverbindungen miteinander verbunden sind. Auf je zwei vierfach geführten plattenartigen Schlitten werden die Reibklötzen, bevor sie mit je einer verschraubten Klemme befestigt werden, durch je einen Anschlagwinkel und an der Rückenfläche ausgerichtet. Das Einleiten der Normalkraft in die Zugprobe erfolgt durch eine beidseitig von Tellerfedern vorgespannte Schraubvorrichtung, die sich an den Aufnahmeplatten abstützt und über die Schlitten auf die Reibklötzen drückt. Die Tellerfedern wirken dem Materialabtrag aus dem Reibverschleiß durch ihre elastischen Eigenschaften, zusammen mit der Translation der über Führungshülsen verfahrenen Schlitten, entgegen. Zudem kann so die Querkontraktion der Zugprobe so ausgeglichen werden.

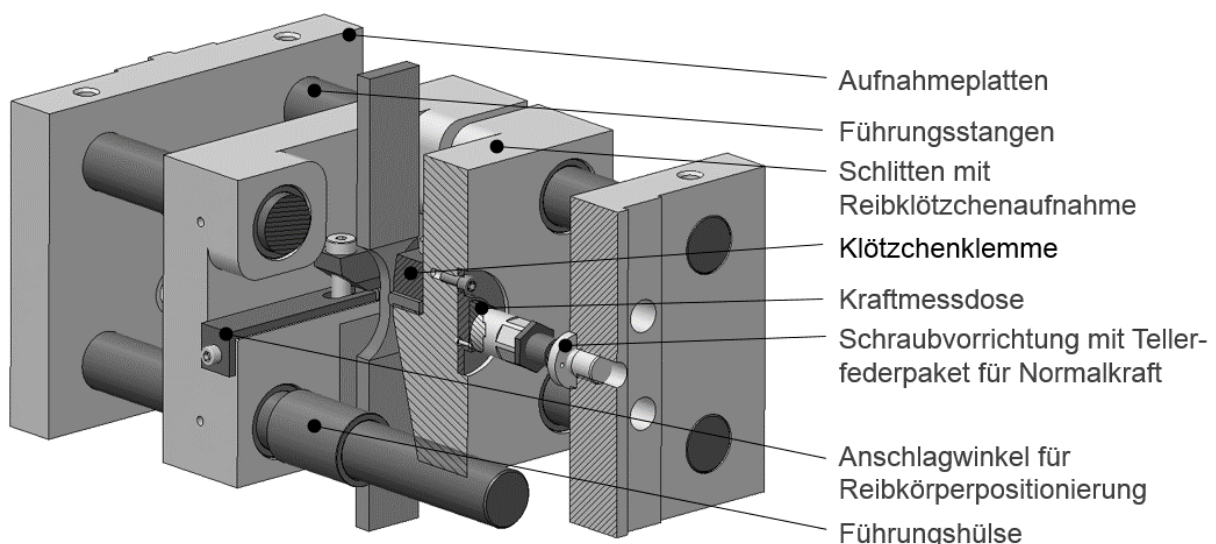


Abbildung 3: überarbeitete Prüfvorrichtung

### Gründe für die Überarbeitung der Vorrichtung

Die bedingte Reproduzierbarkeit von Versuchsergebnissen der bestehenden und konzeptionell ähnlichen Vorrichtung war unter anderem auf das Führungskonzept der Schlitten

ten und die unzureichend genaue Möglichkeit der Reibklötzchenpositionierung zurückzuführen. Zudem war die Steifigkeit der Führungsrohre nicht ausreichend, so dass aufgrund der Durchbiegung der Vorrichtung nur annähernd der gewünschte Schlupfwert zwischen Probe und Reibklötzchen erreicht wurde.

Bei der Ausarbeitung der Fertigungsunterlagen der bestehenden Prüfvorrichtung wurde jedes Teil einzeln und separat toleriert, um möglichst schnell eine fertigungstechnische Umsetzung zu erreichen. Als Folge konnten Toleranzen in ihrer Gesamtheit bezüglich der Baugruppe nicht berücksichtigt werden, so dass nach Fertigstellung der Vorrichtung mit jedem Probewechsel die Justierung der Reibklötzchen durch das Unterlegen von Metallblättchen erforderlich war, um ein gleichmäßiges Tragbild zu erreichen.

Damit dieser Vorgang vermieden werden kann, wurde die überarbeitete Vorrichtung nach der in 2.1 vorgestellten Systematik entworfen und toleriert, wie im Folgenden beschrieben wird.

### **3 Tolerierung der Prüfvorrichtung im Entwurfsprozess**

#### **3.1 Modellierung der Funktionsflächen**

Ausgehend von der Versuchsanordnung und den geometrischen Randbedingungen können, entsprechend des Konzeptes aus 2.4, zu Beginn der Entwurfsphase die Nenn-Geometrielemente im CAD-System auf Baugruppenebene in Form von Flächen erstellt werden. Die Größe der in Abbildung 4 senkrecht und horizontal angeordneten Flächen ist zunächst dem verfügbaren Bauraum angepasst worden, da die genaue Einzelteilgeometrie in diesem frühen Stadium der Entwurfsphase noch nicht bekannt ist. Dieser Vorgang ist hinreichend auch als erster Schritt der klassischen Top-Down-Konstruktion bekannt und das entstandene Gebilde kann auch als Flächenskelett bezeichnet werden.

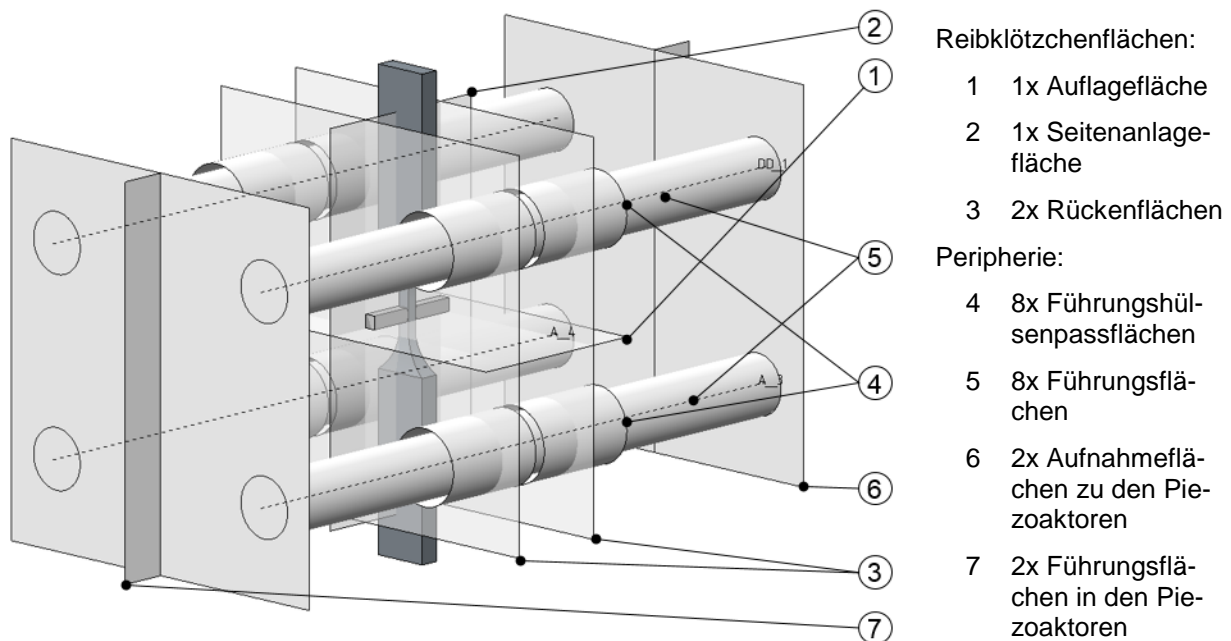


Abbildung 4: Funktionsflächen des neuen Prüfvorrichtungskonzeptes

In Abbildung 4 ist erkennbar, dass sich die Flächen teilweise nicht den späteren Einzelteilen zuordnen lassen, da zu jeder Fläche zwei Kontaktpartner gehören. Die Flächen, die jeweils zur Erstellung der Einzelteile benötigt werden können aus dem Baugruppenmodell parametrisch in das Einzelteil kopiert werden, so dass bei Änderung der Funktionsgeometrie eine synchrone Änderung in den Einzelteilen vollzogen wird.

### 3.2 Hierarchie der Funktionsflächen - Funktionsflächenanalyse

Um die Funktionsflächen zueinander Tolerieren zu können, muss ihre funktionale Reihenfolge definiert werden. Diese kann sich an unterschiedlichen Modalitäten orientieren. Je nach Zielfunktion der Konstruktion können die Belastung, die geometrische Reihenfolge oder die Bewegung die Richtung der Ordnung vorgeben.

Im Beispiel sollen die Flächen von innen, ausgehend von der Hauptfunktion „gleichmäßiges Tragbild“, nach außen geordnet werden. Oberste Priorität hat demnach die gemeinsame Auflagefläche der Reibklötzchen („1“ in Abbildung 4), da die dynamische Kraftübertragung maßgeblich durch diese Fläche realisiert und das Tragbild stark beeinflusst wird. Ebenfalls für die Funktion „gleichmäßiges Tragbild“ bedeutend ist die mit „2“ gekennzeichnete Fläche. Das Übertragen der Normalkraft auf die Reibklötzchen erfolgt über die zwei mit „3“ gekennzeichneten Flächen bis zu den kleineren Zylindern („4“ in Abbildung 4), welche die dynamischen Kräfte durch die Führungshülsen auf die Führungsflächen („5“)



übertragen. Schlussendlich werden die dynamischen Reibkräfte durch eine kraftschlüssige Verschraubung auf die Piezoaktoren („6“) übertragen. Die mit „7“ gekennzeichnete Fläche dient der horizontalen Positionierung der Vorrichtung bzw. der Reibklötzchen gegenüber der Zugprobe. Die Funktionsflächenhierarchie entspricht hier damit der in Abbildung 4 hinterlegten Nummerierung.

Die Reibflächen zwischen Probe und Reibklötzchen werden in der Funktionshierarchie vernachlässigt, da der unmittelbare Kontakt zur Prüfvorrichtung nur bis auf die Reibklötzchen zurückgeht und ihre Tolerierung unter 3.4 in anderer Form berücksichtigt wird.

### 3.3 Bezüge und Bezugssystem im Baugruppenkontext

Die Benennung der Bezüge des Baugruppenbezugssystems folgt der Funktionshierarchie aus 3.2, so dass der Baugruppen-Primärbezug aus der Auflagefläche („1“ in Abbildung 4) der Reibklötzchen und der letzte Bezug durch die in Abbildung 4 mit „7“ gekennzeichnete Fläche hervorgeht. Die Benennung des Primärbezuges ist „AA“, um aufzuzeigen, dass der Baugruppenbezug durch zwei Flächen definiert ist. Zum einen durch die Reibklötzchenfläche und zum anderen durch die ebene Fläche auf der es aufliegt. So wird die Benennung bis Fläche „7“, entsprechend bis „GG“, fortgesetzt. Abbildung 5 zeigt die Bezugsverteilung auf das Baugruppen-Flächenmodell. Im nächsten Schritt sind die geometrischen Beziehungen zwischen diesen Flächen entsprechend der Funktionshierarchie zu definieren und zu tolerieren, um ein vollständiges Bezugssystem zu erhalten, welches auch geometrische Beziehungen und deren Tolerierung abbildet.

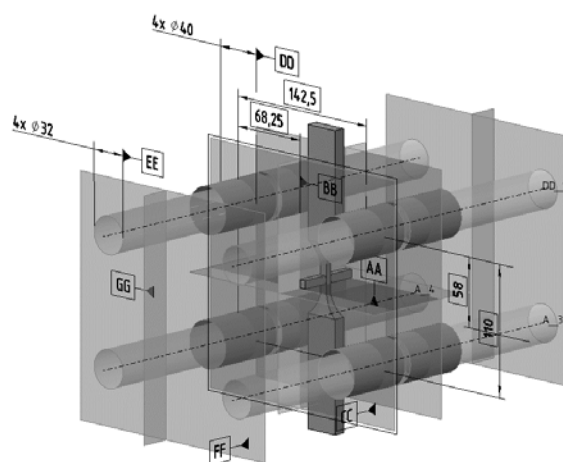


Abbildung 5: Funktionsflächengerüst mit den zugewiesenen Bezugsebenen und -Achsen

### 3.4 Tolerierung in der Baugruppe

Um die Bezüge und Bezugsflächen aus 3.3 in Beziehung zueinander setzen zu können müssen zunächst die geometrischen Zusammenhänge in der Wirkstelle berücksichtigt und die Ausgangswerte für die weitere Tolerierung erfasst werden.

Ausgangspunkt für den Entwurf und die geometrische Tolerierung sind die Zugprobe und die Reibklötzchen. Aus vorangegangenen Versuchen ist bekannt, dass die Reibflächen einen maximalen Winkelversatz von  $0,05^\circ$  und  $0,03^\circ$  in den jeweiligen Neigungsrichtungen um die Z- und Y-Richtung (Abbildung 6) haben dürfen, um ein geeignetes Tragbild zwischen den tribologisch beanspruchten Körpern generieren zu können. Abbildung 6 zeigt die Entstehung der Hauptfunktionstoleranzzonen in der Wirkstelle von zirka  $5\text{ }\mu\text{m}$  und  $3\text{ }\mu\text{m}$ .

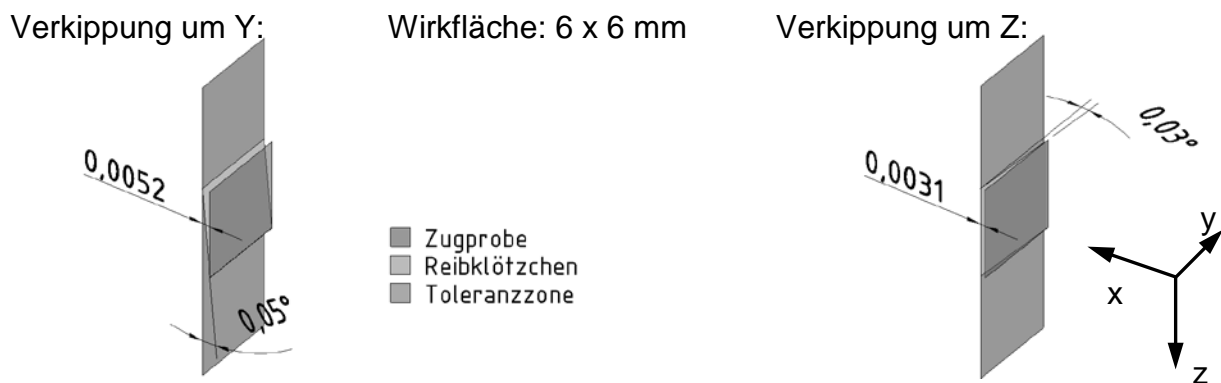


Abbildung 6: Definition der Toleranzzonen in den möglichen Neigungsrichtungen, die gerade noch zu einem geeigneten Trag-Bild zwischen Reibkörper und Probe führen (Darstellung 100-fach überhöht)

Aus diesen beiden Werten können theoretisch die Toleranzen auf die übrigen Einzelteile abgeleitet werden, nachdem die Funktionsflächen modelliert und die Ordnung des Bezugssystems festgelegt wurde. Jedoch konnte durch die Vermessung verschiedener Reibklötzchen und der Zugproben ermittelt werden, dass bereits 60 % des Toleranzbereichs durch die unterschiedliche Fertigung der Proben und Klötzchen aufgebraucht werden, so dass für die Prüfvorrichtung noch  $0,02^\circ$  bzw.  $0,012^\circ$  Toleranz zur Verfügung stehen.

### 3.5 Aufteilung der Toleranzen im Baugruppenkontext

Die Winkeltoleranzen sollen gleichverteilt (arithmetisch) auf die gesamte Toleranzkette bis zum Bezugspaar „GG“ zurückgehen. Ausschlaggebend für die begrenzte Verkipfung

um die Y- beziehungsweise um Z- Achse sind die fünf Bezugspaare „AA“ bzw. „BB“, „CC“, „DD“, „EE“ und „GG“, so dass die aus 3.4 zur Verfügung stehenden Toleranzen mit fünf geteilt werden müssen.

Die Bezüge „AA“ und „BB“ sollen eine allgemeine Formtoleranz von 0,01 mm und eine richtungsgebundene Formtoleranz zur Ausrichtung der Reibklötzchen erhalten. Als Richtungsgebunden eignet sich in diesem Fall je eine Geradheitstoleranz über die Auflagelänge des Reibklötzchens von 22 mm. Der Sachverhalt ist überhöht in Abbildung 7 dargestellt.

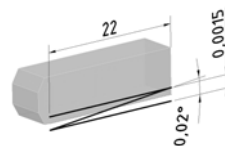


Abbildung 7: Darstellung der Baugruppen-Geradheitstoleranz am Reibklötzchen in erster Richtung am Bezug „AA“

Die Größe der Geradheitstoleranz ergibt sich jeweils aus dem fünften Teil der Winkel der genannten Auflagelänge.

$$t_{\text{Geradheit R1}} = l_{\text{Reibklötzchen}} * \tan\left(\frac{t_{\text{Winkel R1}}}{5}\right) = 22 \text{ mm} * \tan\left(\frac{0,02^\circ}{5}\right) = 0,0015 \text{ mm} \quad (1)$$

$$t_{\text{Geradheit R2}} = l_{\text{Reibklötzchen}} * \tan\left(\frac{t_{\text{Winkel R2}}}{5}\right) = 22 \text{ mm} * \tan\left(\frac{0,012^\circ}{5}\right) = 0,0009 \text{ mm} \quad (2)$$

Die Toleranzwerte 1,5 und 0,9 µm sind jedoch fertigungstechnisch nicht, oder nur unter sehr hohem Kosten- und Technologieaufwand, realisierbar. Die Ergebnisse sind zudem auf die Baugruppe bezogen und müssen auf zwei Einzelteile verteilt werden. Es stellt sich anhand der sehr kleinen Toleranzwerte heraus, dass diese fertigungstechnisch nicht umsetzbar sind und ein Toleranzausgleich konstruktiv vollzogen werden muss. Dies wird durch eine Spielpassung zwischen dem Außendurchmesser der Führungshülsen und dem Innendurchmesser des Schlittens, die im Montageprozess verklebt wird, bewirkt werden.

Die funktionsorientierte Form- und Lagetolerierung wurde an dieser Stelle, wenn auch mit fertigungsorientierten Toleranzwertannahmen, fortgesetzt, um ein durchgehendes Toleranzkonzept für den weiteren methodischen Konstruktionsverlauf zu haben. Das voll-

ständig in funktionaler Reihenfolge spezifizierte Baugruppen-Funktionsflächenmodell wird in Abbildung 8 gezeigt.

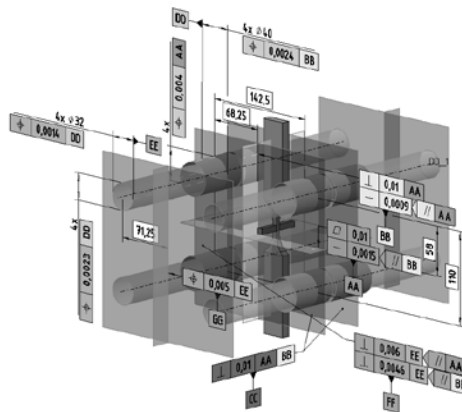


Abbildung 8: geometrisch spezifiziertes Funktionsflächenmodell

### 3.6 Gestaltung und Toleranzaufteilung am Einzelteil

Die Aufteilung soll im Folgenden am Beispiel des Schlittens erfolgen, da dieses Teil die meisten Schnittstellen zu anderen Komponenten im System aufweist.

Zunächst können, wie in Abbildung 9 (links) gezeigt ist, die relevanten Funktionsflächen mit Toleranzen aus dem Baugruppenflächenmodell in das Einzelteil überführt werden und dienen als Ausgangspunkt für die weitere Modellierung.

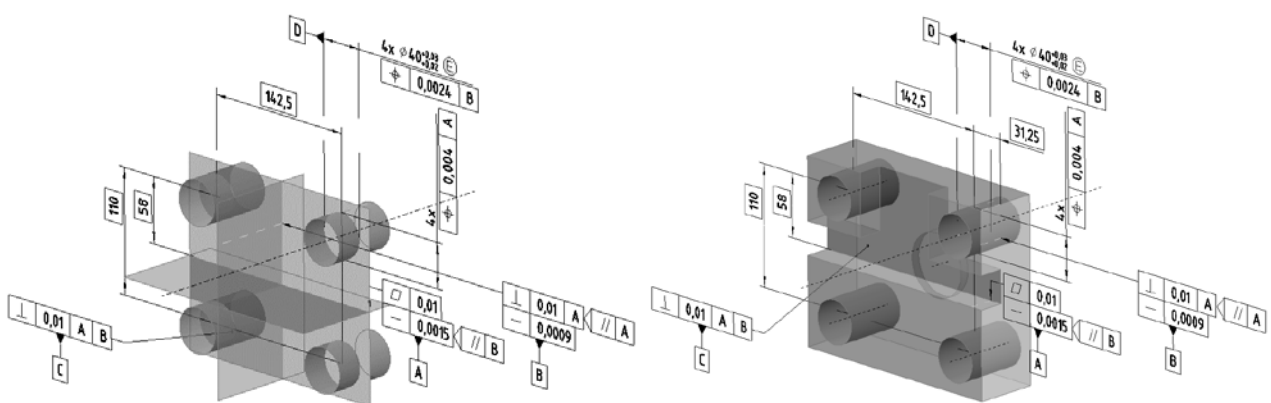


Abbildung 9: Links: kopierte Funktionsflächen mit Toleranzen aus dem Baugruppenmodell, Rechts: Hüllmodell mit Spezifikationen

Mit der Ergänzung weiterer Hüllflächen, die sich außerhalb des unmittelbaren Funktionsbereichs befinden, kann anschließend ein Volumen gebildet und die detaillierte Fein-

gestaltung fortgesetzt werden bis das Teil ausgestaltet und wie in Abbildung 10 vollständig spezifiziert ist.

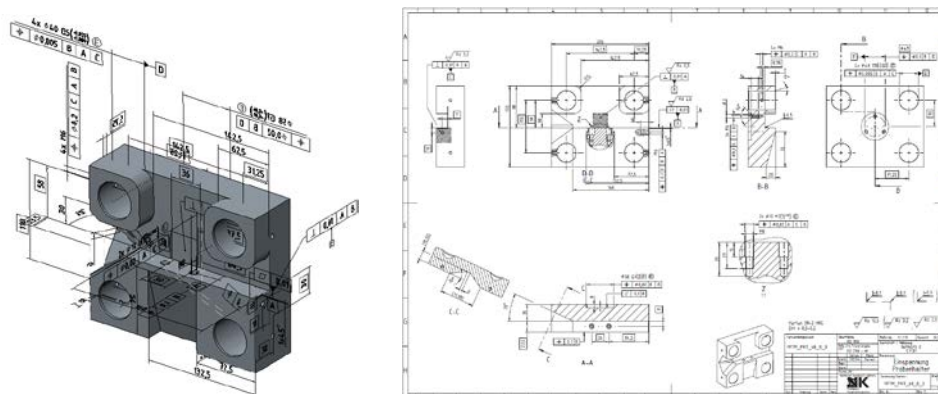


Abbildung 10: vollständig funktionsorientiert spezifiziertes Bauteil mit fertigungsgerecht angepassten Toleranzwerten

## 4 Ergebnis

Die dargestellte Methode zur Tolerierung von Geometrieabweichung im methodischen Konstruktionsprozess hilft dem Konstrukteur durch den Prozess der Form- und Lagetolerierung und gibt mit dem funktionsorientierten Ansatz in der Top-Down-Konstruktion einen Startpunkt für die Tolerierung der Einzelteile noch vor der Phase der Ausarbeitung.

Die in diesem Beitrag aufgeführte entwerfsbegleitende Systematik konnte am Beispiel deutlich zeigen, dass die frühe Tolerierung funktionaler Flächenelemente schnell zu Erkenntnissen bezüglich der fertigungstechnischen Durchführbarkeit funktionaler Form- und Lagetoleranzen führen kann. Entgegen der klassischen Art, Einzelteile nach ihrer Feingestaltung zu tolerieren und anschließend zu analysieren, können konstruktive Änderungen bezüglich des Toleranzausgleiches und der Toleranzverteilung in der frühen Entwurfsphase erkannt werden. Dieser Sachverhalt bringt eine erhebliche Zeitersparnis hervor und der methodische Entwurfsprozess kann so noch effizienter gestaltet werden. Des Weiteren können die Toleranzen unmittelbar aus dem 3D-Modell in die Zeichnungsdokumente abgeleitet werden, so dass die Zeichnung als physisches Ausgabeformat des spezifizierten 3D-CAD-Modells fungiert.

Die arithmetische Toleranzverteilung und Analyse erwies sich, speziell für die sehr präzise Prüfanwendung, als ungeeignet, da die ermittelten Toleranzzonen mit Werten un-

ter 1 µm konventionell nicht realisierbar sind und die Genauigkeit mit anderen Mitteln erzielt werden musste.

Die in diesem Beitrag dargestellte Prüfvorrichtung konnte erfolgreich nach den funktionsorientiert ausgearbeiteten Zeichnungsdokumenten gefertigt und montiert werden. Die Hauptfunktion des gleichmäßigen Tragbildes wurde erreicht.

## 5 Ausblick

Nicht jedes Fertigungsunternehmen kann eine funktionsorientierte Spezifikation so umsetzen, dass die Funktion beim Messen auch verifiziert wird bzw. das Bauteil anschließend funktioniert. Es wird deutlich, dass weitere Methoden nötig sind, um die funktionsorientierte in eine fertigungsorientierte Spezifikation umzuformulieren.

Noch gehören die für die hier aufgezeigte Methode wichtigen 3D-Anmerkungs-elemente nicht zum festen Bestandteil von CAD-Systemen, jedoch wurden mit der Überarbeitung der ISO 1101 [7], hinsichtlich der Tolerierung von Form und Lage im Sinne der 3D-Anwendung, wichtige Vorgaben für die CAD-System-Entwickler gemacht. So wird in Zukunft nicht nur ein kleiner Teil der auf dem Markt befindlichen CAD-Systeme über diesen Funktionsumfang verfügen.

## Literatur

- [1] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre : Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*; 8. Aufl. Berlin: Springer, 2013. – ISBN 978-3-542-29568-3
- [2] Norm DIN 1505 Teil 2 01.84. *Titelangaben von Dokumenten – Zitierregeln*  
{Formatvorlage Literaturverzeichnis, Arial, 10 pt, nummerierte Liste mit Einzug bei 1,2 cm}
- [3] DIN V 32950:1997-04, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Übersicht (ISO/TR 14638:1995)
- [4] VDI 2221, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte , 05/1993
- [5] Ebermann, M.; Leidich E.: Integration der Geometrische Produktspezifikation (GPS) in den methodischen Konstruktionsprozess nach VDI 2221, Konferenzbeitrag „Entwerfen Entwickeln Erleben“ EE-E2014 Dresden, 06/2014
- [6] DIN EN ISO 8015:2011-09, GPS – Grundlagen – Konzepte, Prinzipien und Regeln
- [7] DINE EN ISO 1101:2014-04, GPS – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf

# Effizienzsteigerung des Produktentwicklungsprozesses durch fertigungsgerechte CAD-Methoden

**Marcin Humpa, Peter Köhler**

Institut für Produkt Engineering

Lehrstuhl für Rechneinsatz in der Konstruktion, Universität Duisburg-Essen

Lotharstr. 1, 47057 Duisburg

E-Mail: marcin.humpa@uni-due.de; Internet: <http://www.uni-due.de/cae>

**Inhalt:** Zur Effizienzsteigerung des Produktentwicklungsprozesses ist es notwendig, aktuelle Lösungen hinsichtlich ihrer Brauchbarkeit in der gesamten Prozesskette zu analysieren. Da die Entscheidungen in der Konstruktion auch großen Einfluss auf die Fertigungskosten haben, hat die Absicherung der Fertigungsgerechtigkeit für CAD-CAM-Kopplungen eine besondere Bedeutung. In diesem Beitrag werden fertigungsgerechte CAD-Methoden anhand von ausgewählten Problemfeldern für Dreh- und Frästeile vorgestellt. Es wird gezeigt, wie technologische Fertigungsinformationen über spezielle Featuretechniken und Applikationsanbindungen in den CAD-Prozess integriert werden können. Verdeutlicht wird auch, wie dadurch die Qualität von CAD-CAM-Kopplungen erhöht werden kann.

**Abstract:** To increase the efficiency of the product development process, it is essential to analyze the usability of current solutions along the entire process chain. The decisions during the design phase influence strongly the manufacturing costs, which indicates the significant importance of ensuring manufacturability for CAD-CAM-couplings. In this paper, manufacturing-oriented CAD methods are presented based on selected problem areas for turning and milling parts. It will be shown how technological manufacturing information can be integrated in the CAD process via special feature-techniques and application binding. In addition, it will be illustrated how the proposed methods increase the quality of the CAD-CAM-coupling.

**Stichwörter:** fertigungsgerechte Modellierung, featurebasierte CAD-CAM-Kopplung, CAD-Methodik,

**Keywords:** design for manufacturability, manufacturing-oriented design, feature-based CAD-CAM coupling, CAD methodology.

## 1 Einleitung

Zur Effizienzsteigerung der virtuellen Produktentwicklung wurden schon in der Vergangenheit verschiedene methodische Vorgehensweisen vorgeschlagen und entwickelt, um die Entwicklungszeiten und -kosten zu minimieren, gleichzeitig aber die Qualität und die Vielfalt der geometrischen Gestaltungsmöglichkeiten zu steigern. Schon sehr früh wurden Ansätze für eine Modellierungsmethodik auf Basis fertigungsorientierter Feature ent-

wickelt. Im Jahre 2003 mündeten Ergebnisse dieser Arbeiten in die VDI Richtlinie 2218 [1]. Betrachtet man jedoch die aktuelle Situation, dann kann festgestellt werden, dass nach wie vor nur elementare fertigungsorientierte Feature wie Bohrung, Rundung oder Fase in den CAD-Systemen verfügbar sind. Allerdings kann deren Einsatz durch die Konstrukteure über alternative Modellierungsmethoden umgangen werden. Die heutige oft favorisierte Art der völlig freien Modellierung soll zwar der kreativen Gestaltungsfreiheit des Konstrukteurs mehr Freiraum lassen, führt jedoch mitunter dazu, dass die Modellqualität zu stark von subjektiven Faktoren abhängig ist. Dies kann auch zu enormen Problemen bei der Übergabe des CAD-Modells in die CAM-Umgebung führen und somit zu Zeitverzögerungen und Kostensteigerungen. Mit diesem Problem haben nicht nur die eigenen Unternehmensbereiche zu kämpfen, sondern auch die beauftragten Lohnfertiger. Nicht selten investieren diese viel Zeit, um das Modell dahingehend zu optimieren, dass eine vernünftige Überführung in CAM-Umgebung ermöglicht wird. Im Optimalfall bedeutet es, dass die zu fertigenden Form-Features aus dem CAD-Modell automatisch über Feature-Erkennungstools erkannt bzw. extrahiert werden können. Einige CAM-System Hersteller wie z. B. Tebis oder Mastercam bieten Lösungen für eine automatisierte Überführung der CAD-Geometrie in die CAM-Umgebung an. Die erkannten Features und/oder Geometrie-elemente werden mit den CAM-system spezifischen Fertigungsfeatures gepaart (Features Mapping), so dass die enthaltenen geometrischen und technologischen Parameter für die Fertigungsplanung und NC-Programmierung genutzt werden können. Somit lassen sich Fehler durch manuelles Übertragen von Fertigungsinformationen minimieren und die Sicherheit des virtuellen Fertigungsprozesses kann damit gesteigert werden. Diese Lösung beschränkt sich jedoch meist auf die Bearbeitung von sog. Standardgeometrieelementen (planare, zylindrische oder konische Flächen) über 2,5-D-Bohr- und Fräsbearbeitungsprozesse. Die Leistungsfähigkeit ist vom Softwaresystem zu Softwaresystem unterschiedlich (vgl. auch [2]) und hängt von der Leistung der Schnittstelle und den implementierten Algorithmen zur Feature-Erkennung und Feature-Mapping ab. Aus dieser Sicht ist sicherlich eine vollständig integrierte CAD-CAM-Lösung am leistungsstärksten, da bei einer solchen Konstellation die Geometrieübergabe direkt über ein natives Format (ohne Datenkonvertierung) erfolgt. Ein weiterer Nutzungsvorteil der integrierten CAD-CAM-Lösung besteht in der Möglichkeit, die Anforderungen der nachgeschalteten Prozesse in möglichst frühen Phasen der Produktentwicklung zu berücksichtigen, um beispielsweise eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit durch die Einbeziehung der Fertigungsstrategie anzustreben. Um die



Potenziale solcher CAD-CAM-Lösungen vollständig auszuschöpfen sind neben den Geometriemodellierungsmethoden weitere CAD-Methoden erforderlich, welche eine fertigungsorientierte Produktentwicklung unterstützen.

## 2 Wissenstransfer zwischen Fertigung und Konstruktion

Beim fertigungsgerechten Gestalten ist abzusichern, dass ein Werkstück in der geforderten Qualität bezüglich der Genauigkeit und der Gestalt mit geringem Aufwand unter Nutzung der gegebenen Fertigungsverfahren und Fertigungsmittel hergestellt werden kann. Somit bietet sich die Einbeziehung der Produktionsmittel und -methoden und damit der Fertigungsstrategie in einer möglichst frühen Phase des virtuellen Produktentwicklungsprozesses als sinnvoller Lösungsansatz an. Dafür ist ein Wissenstransfer zwischen der Fertigung, Arbeitsvorbereitung und der Konstruktion notwendig. Zu den Informationen, die Einfluss auf die Geometrie haben können, gehören z. B. Informationen über die Verfahrenswege, Werkzeuggeometrie, Positionierung und Ausrichtung des Fertigungswerkzeugs zum Rohteil oder die Geometrie des Spanvorganges (siehe Abbildung 1).

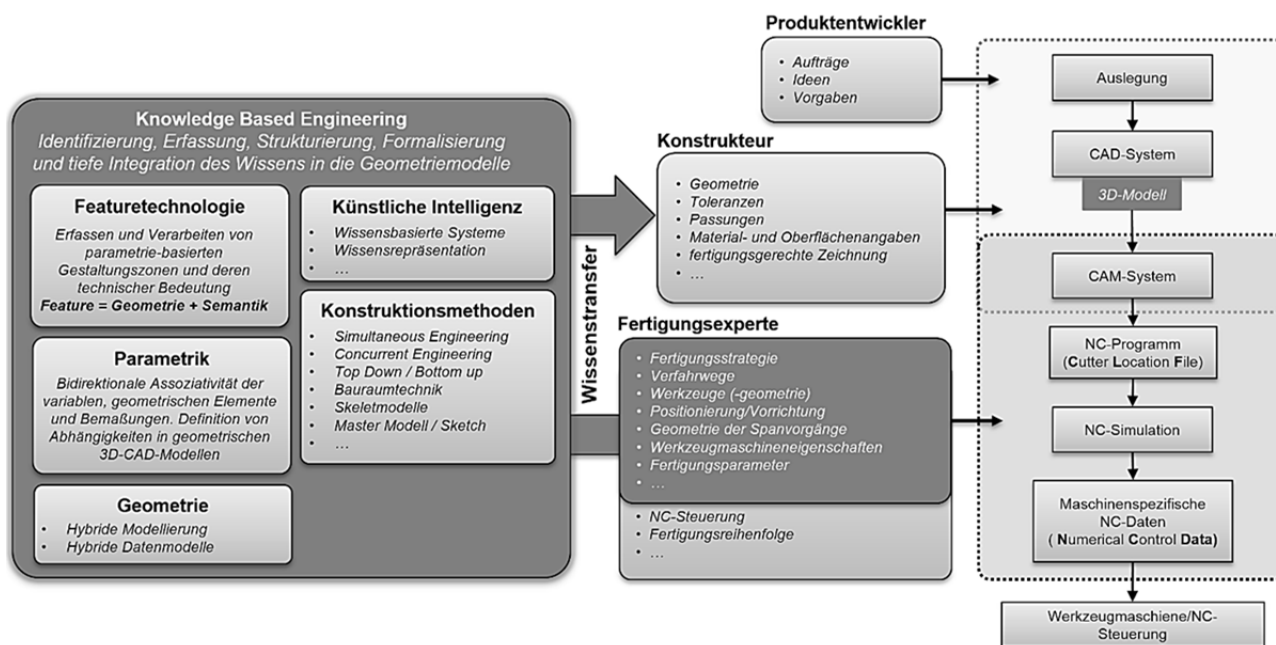


Abbildung 1: Wissenstransfer zwischen Konstruktion und Fertigung

Der Wissenstransfer zwischen der Fertigung und Konstruktion kann durch einen gezielten Einsatz von speziellen Konstruktionsmethoden und Modellierungsstrategien, Feature-Technologie und etc. erfolgen. Dabei ist die Einbringung des Fertigungswissens durch

die Feature-Technologie besonders hervorzuheben. Als Feature wird die Aggregation von Geometrie und/oder Semantik verstanden [3]. Nicht für alle Fertigungsoperationen stehen dem Konstrukteur in den CAD-Systemen entsprechende fertigungsorientierte Features zu Verfügung. Für die einfachen Fälle, wie z. B. Taschenfräsen, welche sich aus Sicht der Geometriegestaltung durch eine räumliche Translation eines ebenen Querschnittes realisieren lassen, gibt es Problemfelder, in denen die mitgelieferten Funktionen eines CAD-Systems nicht immer ausreichen, um Fertigungsvorgänge fehlerfrei abbilden zu können. Um diesen Nachteil zu kompensieren, gleichzeitig aber die CAD-CAM-Prozesskette effizienter zu gestalten, ist eine Modellierungsmethodik zum zerspanungsorientierten Geometrieaufbau zu entwickeln. Zusammen mit diesen Features und semantischen Informationen können dann auch die Fertigungsschritte mit den dazugehörigen Werkzeugen und weiterem Fertigungswissen für die NC-Programmierung hinterlegt werden.

### **3 Fertigungsgerechte CAD-Methoden**

Der Konstrukteur soll nicht zum Fertigungsexperten werden. Aber für den Konstrukteur sollen CAD-Methoden entwickelt und zu Verfügung gestellt werden, die ihn bei der fertigungsgerechten Modellierung unterstützen. Dazu zählen u. A.:

- Feature zum zerspanungsorientierten Geometrieaufbau der CAD-Modelle,
- Methoden zur CAD-Einbindung technologischer Fertigungsinformationen
- Methoden zur CAD-CAM-Kopplung auf Basis fertigungsorientierter Features.

Im Folgenden werden die genannten CAD-Methoden an Beispielen diskutiert.

#### **3.1 Zerspanungsorientierter Geometrieaufbau**

Drehen, Fräsen und Bohren sind weit verbreitete spanende Fertigungsverfahren, welche bezüglich des zu bearbeitenden Werkstoffs, der Werkstückgeometrie und der Stückzahl sehr flexibel einsetzbar sind. Auch bei den leistungstärksten 3D-CAD-Systemen gibt es noch keine systeminterne Applikation, die den zerspanungsorientierten Geometrieaufbau unterstützt. Ausgenommen sind hier Features/Konstruktionselemente (KEs) wie Profilextrusion, Drehen oder Bohrung, welche mit den entsprechenden Fertigungsschritten wie Fräsen, Drehen und Bohren assoziiert werden können. In den 3D-CAD-Systemen existieren jedoch weitere formgebende Konstruktionselemente mit umfangreichen geomet-

riesteuernden Optionen, bei derer Anwendung nicht zwangsläufig eine fehlerfreie Geometrie eines Zerspanungsvorgangs abbildet werden kann. In der Abbildung 2 ist die Übereinstimmung der CAD-Feature Geometrie mit der Zerspanungsgeometrie für einige Beispiele aufgezeigt.

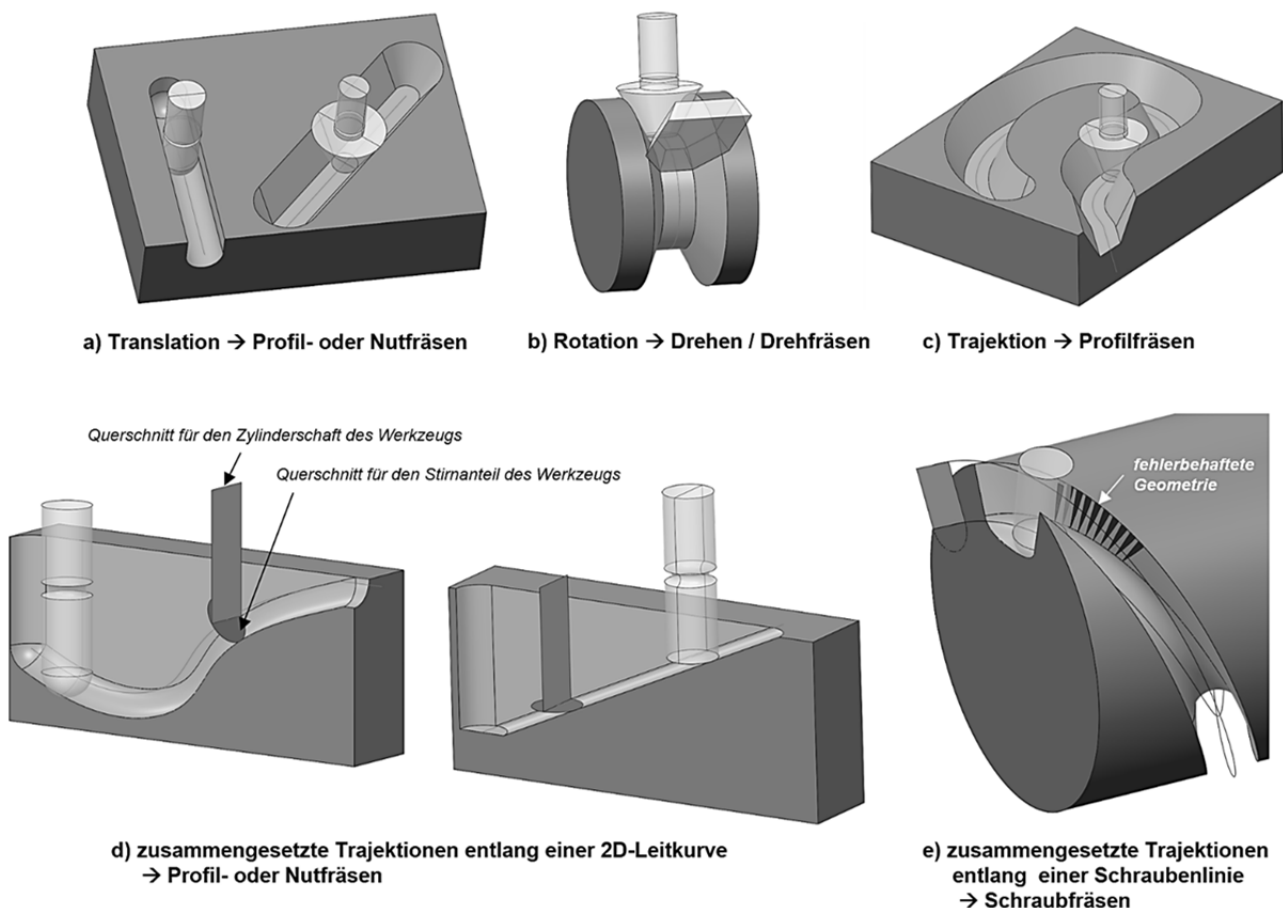


Abbildung 2: Übereinstimmung der CAD-Feature Geometrie mit der Zerspanungsgeometrie

Für die Beispiele (a)-(c) wird zur Erstellung der CAD-Geometrie ein Werkzeugquerschnitt entlang einer 2D-Leitkurve bewegt. Die Übereinstimmung der CAD-Geometrie mit der Geometrie aus dem realen Zerspanungsvorgang ist gegeben. Im Fall (d) ist die geometrische Übereinstimmung durch geschicktes Zusammensetzen unterschiedlich ausgerichteter Trajektionen mit den entsprechenden Werkzeugteilquerschnitten entlang einer 2D-Leitkurve erreicht. Fall (e) repräsentiert ein Beispiel, wo die CAD-Feature Geometrie mit der Geometrie des Spanvorgangs beim Schraubfräsen nicht übereinstimmt. Die Ursache hierfür ist der realer Werkzeugeingriff in das Werkstück, welches in der Realität nicht mehr zweidimensional ist. Durch das Austragen eines Werkzeugquerschnitts entlang einer

Schraubenlinie entsteht im CAD-System eine Wendelnut, die zu schmal ist (siehe Kontrollschnitt in der Abbildung 2). Je nachdem wie die räumliche Anordnung des Werkzeugs zum Werkstück ist, ergibt sich beim Schraubfräsen eine unterschiedlich komplexe Geometrie des Zerspanungsvorgangs. Der Ausweg zur Gestaltung zerspanungsorientierter Geometriemodelle führt über die Flächenmodellierung (vgl. auch [4] [5] [6]). Durch eine geschickte Kombination der analytischen Kurvenbeschreibungsmethoden zusammen mit Flächenmodellierungsschritten können in den CAD-Systemen zerspanungskonforme Features für unterschiedliche Werkzeuggeometrie aufgebaut werden.

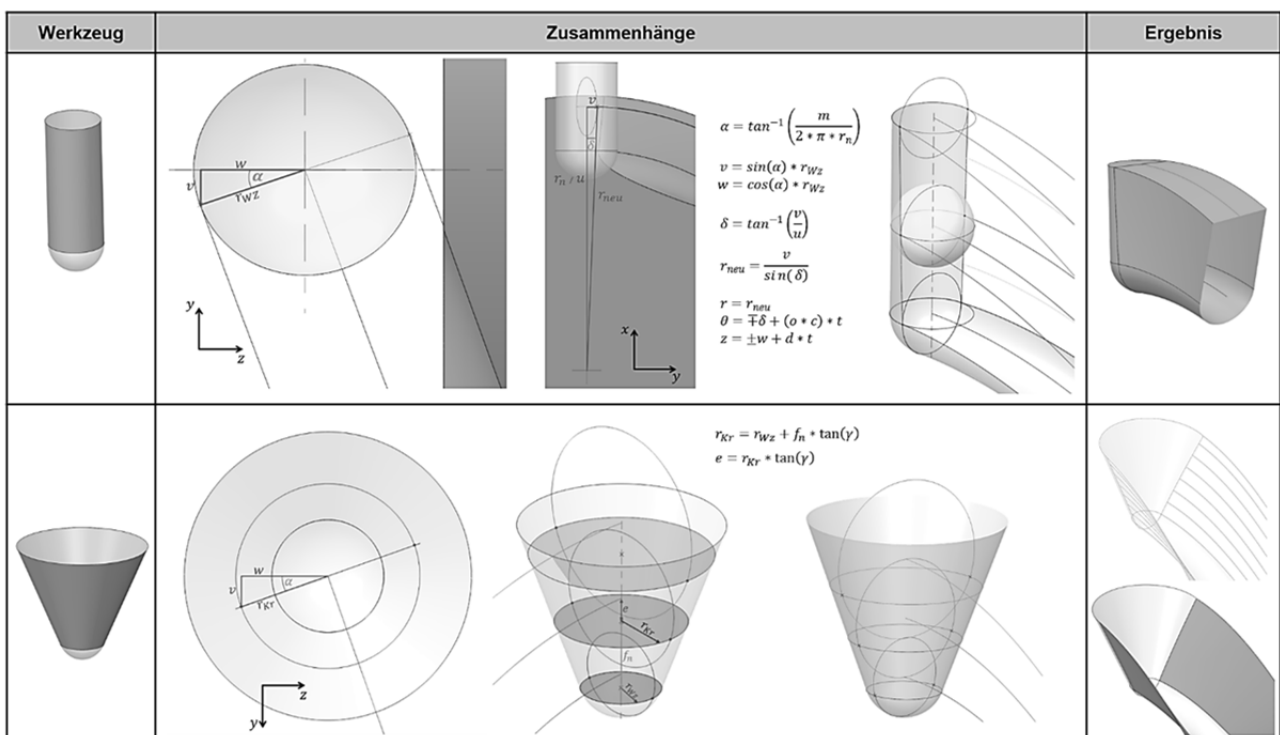


Abbildung 3: Zerspanungsorientierte Features für Schraubfräsen

In der Abbildung 3 sind Beispiele dargestellt, welche zeigen, wie einige geometrische, werkzeugabhängige Zusammenhänge mit Flächenmodellierungsmethoden verknüpft werden können. Die Herausforderung hier liegt in der mathematischen Beschreibung der Hüllkurven, welche die seitliche Flankenfläche der Werkzeugbewegungshülle bilden.

Ist die Drahtgeometrie der Werkzeughülle ermittelt, folgt im weiteren Schritt der flächenbasierte Modell Aufbau mit zahlreichen Flächenoperationsschritten zur Ausgestaltung der gesamten Werkzeugbewegungshülle. Durch den Einsatz von benutzerdefinierten Features (**User Defined Feature-UDF**), in die auch relevante Fertigungsinformationen integriert

werden, können die einzelnen Modellierungsschritte zusammengefasst und in einer Datenbank für zukünftige Anwendungen bereitgestellt werden.

### 3.2 Einbindung technologischer Fertigungsinformationen

Fertigungsorientierte Features sind teilweise neben den sog. Geometrie- oder Form-features bereits in CAD-Systemen integriert. So können bei einer Gewindebohrung bereits vordefinierte Normreihen berücksichtigt werden. Für den Fall einer speziellen, nicht normierten Bohrung, können auch innerhalb des Features weitere Bohrungsparameter, wie zum Beispiel der Spitzenwinkel des verwendeten Bohrers sowie eine eventuell erforderliche Kegel- oder Stirnsenkung definiert werden. Das fertigungsorientierte Gewindebohrungsfeature in der CAD-Umgebung enthält drei Fertigungsschritte (Bohren, Senken und Gewindeschneiden), welche allerdings keine Informationen über die einzusetzenden Werkzeuge oder ihre Reihenfolge liefert. Somit liegt es nahe, nicht nur die bestehenden CAD-Features um diese Informationen zu ergänzen, sondern dem Konstrukteur auch neue Geometrie- und Semantik-Features mit Fertigungsinformationen zu Verfügung zu stellen.

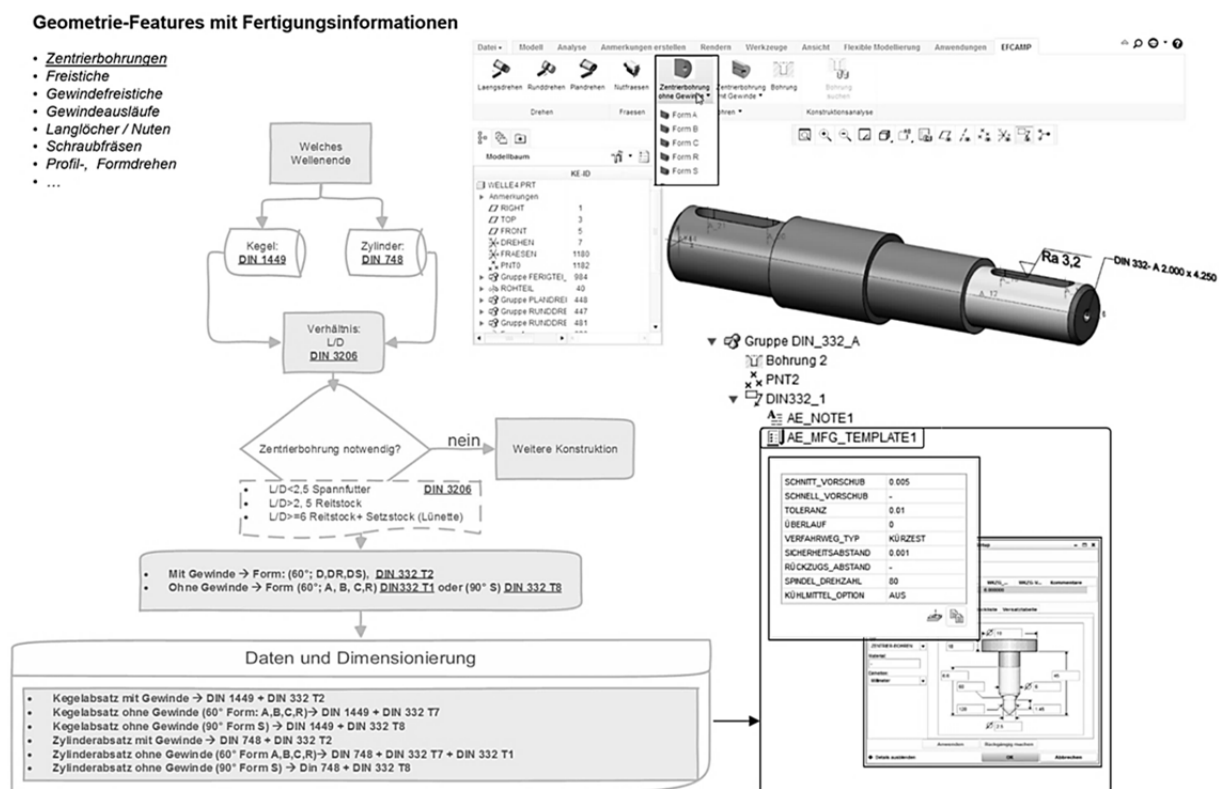


Abbildung 4: Zentrierbohrung als Geometrie-Feature mit Fertigungsinformationen

Die Abbildung 4 stellt ein Beispiel für ein Zentrierbohrungsfeature dar, welches nicht standardmäßig in dem CAD-System Creo 2.0 nicht verfügbar ist.

Die Einbindung der besonderen Geometrie der Zentrierbohrung kann hier über ein Bohrungsfeature realisiert werden, indem je nach Form (z. B. A, B, C, R) ein entsprechender Querschnittsverlauf in dem Bohrungsfeature abgelegt wird. Die Einbindung der technologischen Informationen über das einzusetzenden Fertigungswerkzeug und Prozessparameter lassen sich durch spezielle Fertigungsschablonen an das Geometrie-Feature koppeln. Die Ermittlung der geometriegebundenen Fertigungsinformationen und ihre Einbindung in die Fertigungsschablone erfolgt über die speziell entwickelten Entscheidungshilfen. Diese unterstützen den Konstrukteur nicht nur bei der Dimensionierung und Bestimmung der Fertigungswerkzeuge und Parameter, sondern auch bei Entscheidungen über die Notwendigkeit des Features in dem zu konstruierenden Bauteil (vgl. Abbildung 4). Durch die Möglichkeit der Generierung benutzerdefinierter Features innerhalb der CAD-Systeme werden die neuen, höherwertigen, fertigungsorientierten Features mit Fertigungsinformationen in einer Datenbank für zukünftige Anwendungen abgelegt.

Als Beispiel für ein semantisches Feature mit Fertigungsinformationen kann an dieser Stelle das Oberflächengüte-Feature dienen.

Die Angaben über die Grob-/Feinheit der Oberfläche werden meist aus der Funktionsicht der Gesamtkonstruktion festgelegt. Durch diese Angaben werden schon während des Konstruktionsprozesses (oft unbewusst) die Fertigungsschritte festgelegt, um die Oberflächenqualität zu erreichen. Diese Informationen über die Schrupp- und anschließende Schlichtvorgänge können in Abhängigkeit von der Dreh- oder Frästeilkonstruktion mit den notwendigen Werkzeugen und Prozessparametern wie Schnittgeschwindigkeit und Vorschub gekoppelt werden und mit Hilfe der Fertigungsschablone an das Feature eingebunden werden. Die Empfehlungen über die Anzahl der Fertigungsschritte, dazugehörigen Werkzeuge und die Technologieparameter kann in Abhängigkeit von der Werkstoffklasse des Werkstücks, der Bearbeitungsart und der Maschine automatisch vorgeschlagen und in die entsprechende Fertigungsschablone eingeschrieben werden. Dies kann beispielsweise durch eine entsprechende Einbindung eines digitalen Werkzeugkatalogs mit Entscheidungshilfen (hier der Fa. SANDVIK) an das CAD-System realisiert werden (siehe Abbildung 5).

### Semantische-Features mit Fertigungsinformationen

- Oberflächenangaben
- Rund-, Plandrehen
- Spannflächen
- Oberflächenbehandlung
- ...

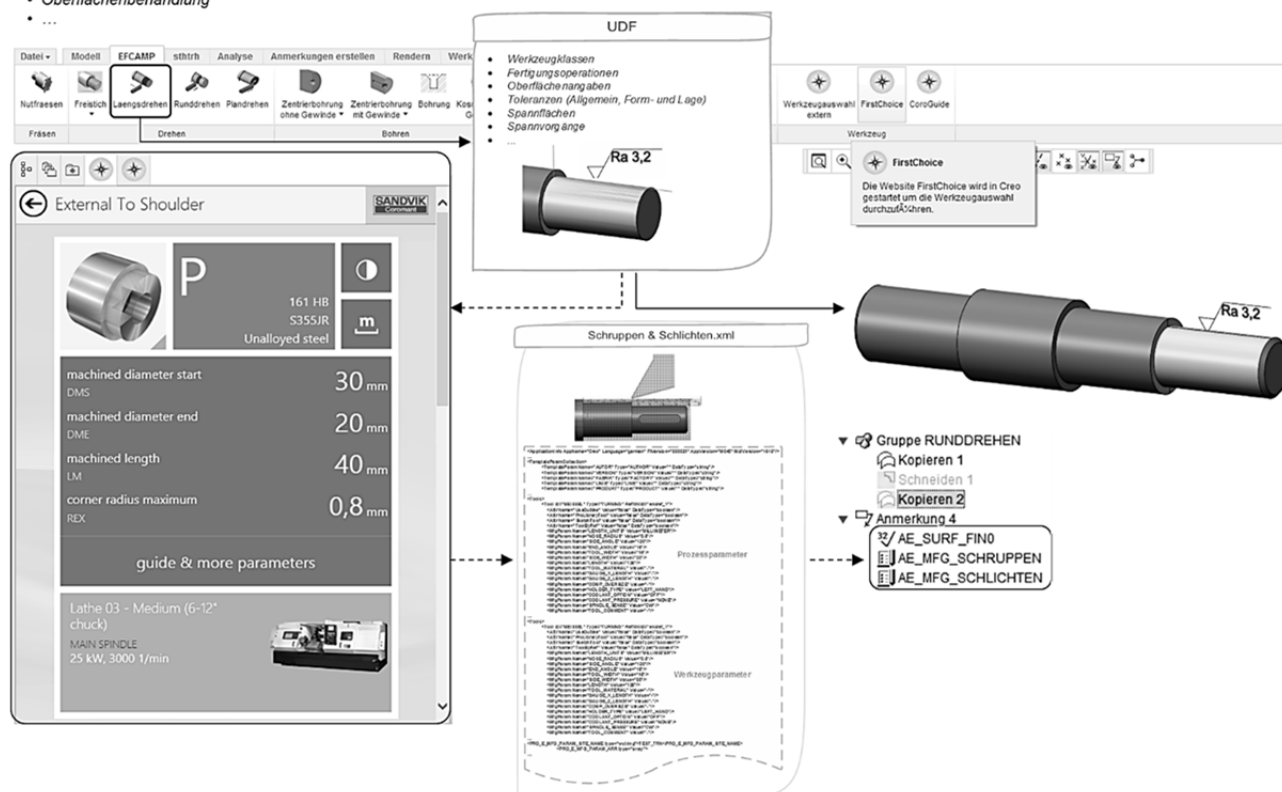


Abbildung 5: Oberflächenangabe als semantisches Feature mit Fertigungsinformationen

### 3.3 CAD-CAM-Kopplung auf Basis fertigungsorientierter Features

Die vorgestellten Methoden zum zerspanungsorientierten Geometrieaufbau von 3D-CAD-Modellen und zur Einbindung technologischer Fertigungsinformationen bilden die grundlegende Basis der CAD-CAM-Kopplung auf Basis fertigungsorientierter Features. Die Absicherung fertigungskonformer 3D-CAD-Modelle schon während des Konstruktionsprozesses vereinfacht den CAD-CAM-Prozess. Durch die Nutzung der neuen höherwertigen und fertigungsorientierten Features zusammen mit einer vollständig integrierten CAD-CAM-Lösung (wie z. B. Creo 2.0 als CAD-System und Creo-NC als CAM-System) lassen sich anhand der featurebasierten Informationen die einzelnen Fertigungsfolgen automatisch aus dem CAD-Modell extrahieren (siehe Abbildung 6). Für den Fall einer voneinander entkoppelten Softwarelandschaft der CAD- und CAM-Systeme können müssen die Geometriedaten in einem neutralen Austauschformat (STEP, IGES, JT, ...) transferiert werden. Die höherwertigen, fertigungsorientierten Features werden ergänzend dazu in eine separate JSON-Datei ausgeschrieben. Dabei handelt es sich um ein kompaktes les-

bares Datenaustauschformat (**J**ava**S**cript **O**bject **N**otation - JSON). Der Vorteil des JSON-Formates liegt in der Unabhängigkeit von der Programmiersprache und einer einfachen Interpretierbarkeit. Lässt sich die JSON-Datei über geeignete Parser zusammen mit der Geometriedatei in einem CAM-System einlesen, können auch in den CAM-Systemen die featurebasierten Informationen ausgelesen und Fertigungsschritte extrahiert werden.

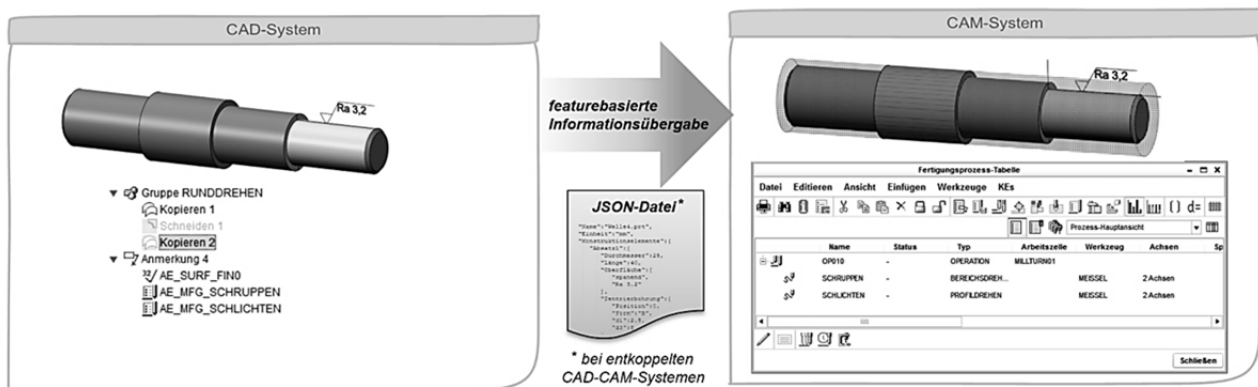


Abbildung 6: Featurebasierte Informationsübergabe

Diese vorgestellte Vorgehensweise bietet nicht nur den Vorteil, dass Fehler durch eine manuelle Eingabe von Fertigungsinformationen minimiert werden, sondern es kann damit auch verhindert werden, dass ein Fertigungsschritt vergessen wird.

### 3.4 Zusammenfassung

Mit den in diesem Beitrag vorgestellten Ansätzen wird gezeigt, wie der Aufwand für eine zeitnahe Überführung der CAD-Modelle in die CAM-Systeme minimiert und dadurch die Effizienzsteigerung der CAD-CAM-Prozesskette erreicht werden kann. Es wurden CAD-Methoden zum zerspanungsorientierten Geometrieaufbau der CAD-Modelle durch fertigungsorientierte CAD-Features vorgestellt. Die Einbindung technologischer Fertigungsinformationen an die CAD-Modelle erfolgt dabei durch die Einbindung von Fertigungsinformationen in die fertigungsorientierten CAD-Features. Bei der CAD-CAM-Kopplung werden dann die angereicherten Featureinformationen des CAD-Modells für die teilautomatisierte NC-Programmierung ausgewertet. Durch die Einbindung der Methoden in frühen Phasen der Produktentwicklung kann die Wirtschaftlichkeit in der gesamten Prozesskette positiv beeinflusst werden.



---

## Literatur

- [1] VDI 2218: *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung*. Feature-Technologie, März 2003. Düsseldorf 2003.
- [2] PLM-Jahrbuch 2014: *PLM-Jahrbuch 2014*. Der Leitfaden für den PLM-Markt 2014.
- [3] Rieger, E.: *Semantikorientierte Features zur kontinuierlichen Unterstützung der Produktgestaltung*. München, Berlin 1995. 978-3446180369.
- [4] Humpa, M.; Köhler, P.: *Beitrag zur Gestaltung fertigungsgerechter 3D-Modelle anhand der räumlichen Ausprägung spanender Fertigungsverfahren*. In: Heuwold, N.; Paul, L. (Hrsg.): *3D-NordOst 2012*. 1. Aufl. Berlin: GFal. 2012. ISBN: 978-3942709071.
- [5] Humpa, M.; Köhler, P.: *Ein Modellierungsansatz zur funktions- und fertigungsgerechten Gestaltung schraubgefräster Bauteile*. In: Brökel, K.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Frank, R.; Stelzer, R. (Hrsg.): *11. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2013*. 1., Aufl. Aachen: Shaker Verlag. 2013. ISBN: 978-3844021820.
- [6] Humpa, M.; Köhler, P.: *Design Approach for Spiral Milling Parts Using Knowledge Based Engineering*. In: IOPscience (Hrsg.): *27th International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future 2014*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: IOP Publishing. 2014. ISSN: 1757-8981. URL: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/65/1/012001>.



# Entscheidungsunterstützung bei der kunden- und anbietergerechten Konzeptentwicklung im Rahmen der Angebotsdefinition in der Anpassungs- und Variantenkonstruktion

**Markus Walch, Albert Albers**

IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kaiserstr. 10, 76131 Karlsruhe

E-Mail: Albert.Albers@kit.edu, Walch@mail.ipek.kit.edu

Internet: <http://www.ipek.kit.edu>

**Inhalt:** Infolge hoher Variantenvielfalt, zunehmend komplexeren Produkten und sinkenden Entwicklungszeiten wird es immer wichtiger, auf bestehende Produktlösungen effizient zurückgreifen zu können, um in kurzer Zeit kunden- und anbietergerechte Angebote erstellen zu können. Gerade bei der Neukonfiguration von bestehenden Subsystemen zu verkaufsfertigen Gesamtsystemen gibt es ein erhebliches Verbesserungspotential. Im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes mit einem Tier-1-Automobilzulieferer für Motorkomponenten wurden Ursachen, Einflussfaktoren und Charakteristika von vermeidbaren Iterationen mittels qualitativer Expertenbefragungen erfasst, um daraus Erkenntnisse im Hinblick auf die Bedarfssituation von Konstrukteuren in der industriellen Praxis zu sammeln. Ziel ist es, Konstrukteure bei der Konzeptentwicklung methodisch zu unterstützen, indem Varianten toolbasiert abgeleitet und auf Basis der aktuellen kunden- und anbieterseitigen Randbedingungen bewertet werden können.

**Abstract:** High numbers of variants, increasing product complexities and decreasing development periods enhance the importance of efficient selecting product variants based on existing solutions in order to derive offers that fit customer's and internal requirements within tight time ranges. In this context, there is a remarkable potential in making the design selecting process more efficient. Within a joint project with a tier 1 automotive supplier qualitative expert interviews were carried out in order to identify causes, influences and characteristics of avoidable design activities. The results are used to derive design engineers' needs regarding design selecting during the tender phase. The objective is to methodically support design engineers in design selecting by tool-based deduction and evaluation of product variants based on the current customer and internal requirement profile.

**Stichwörter:** Vermeidbare Konstruktionsaktivitäten, Angebotsphase, Variantenkonstruktion, Entscheidungsunterstützung, situationsgerechte Konzeptentwicklung, Produktkonfiguration.

**Keywords:** Avoidable design activities, tender phase, variant design, decision support, situational design selection, product configuration.

## 1 Ausgangssituation

Die Wettbewerbssituation in der Automobilindustrie erfordert stetig sinkende Entwicklungszeiten trotz in vielen Bereichen steigender Produktkomplexität und der zunehmenden Forderung nach kundenindividuellen Produktlösungen <sup>0</sup>. Diese Entwicklung hat direkte Auswirkungen auf den Prozess der Konzeptentwicklung bei den automobilen Zuliefererunternehmen, die im Falle einer Angebotsanfrage durch Kunden innerhalb kurzer Zeiträume reagieren müssen, um konkurrenzfähig am Markt zu sein. Aus diesem Grund muss oftmals auf abgeleitete Varianten auf Basis eines bestehenden Grundbaukastens zurückgegriffen werden. Dabei entscheidet die effiziente Anpassung und Neukonfiguration der bestehenden Lösungen darüber, ob der Zuschlag für einen Auftrag erteilt wird.

Dieser Beitrag berichtet über eine aktuelle wissenschaftliche Arbeit, die sich aus Sicht der automobilen Zulieferindustrie mit der Neukonfiguration bestehender Produktlösungen für neue Kundenanfragen befasst. Ausgangspunkt ist die Frage nach dem Konstruktionsaufwand, der in der Angebotsphase, d.h. von Anfrageeingang bis zur Angebotsabgabe, betrieben wird, um ein kunden- und anbietergerechtes Angebot zu erstellen.

Zur Veranschaulichung dieses Sachverhaltes zeigt Abbildung 1 ein Beispielszenario eines Variantenauswahlprozesses, bei dem die Anfrage ausgehend vom Kunden (OEM) über den Vertrieb an die produktspezifische Projektleitung gelangt. Da der Zeitraum für die Angebotserstellung oft eng bemessen ist, wird versucht, in Absprache zwischen Kunden, Projektleitung und Konstruktionsabteilung zu einem möglichst frühen Zeitpunkt ein erstes Zielsystem <sup>0</sup> zu definieren (ZS1 in Abbildung 1), das die expliziten kunden- und anbieterseitigen Ziele, einschließlich deren Abhängigkeiten und Randbedingungen enthält <sup>0</sup>.

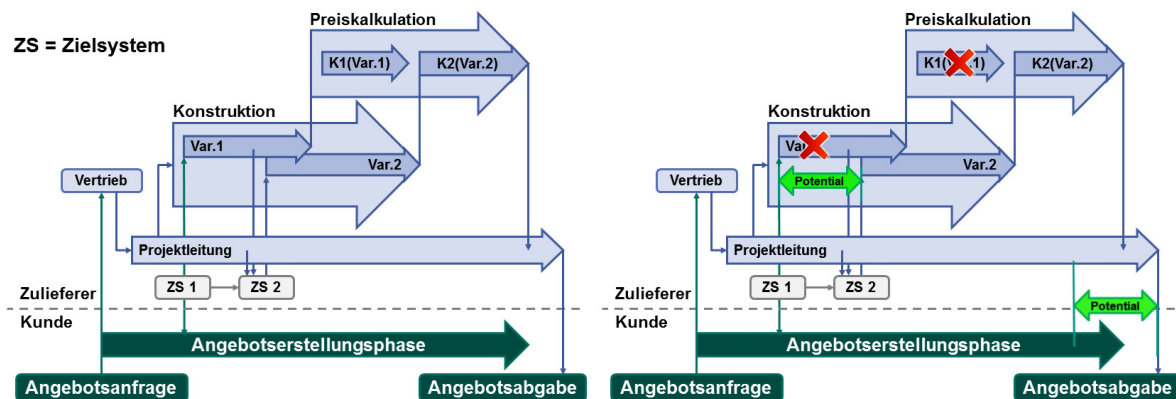


Abbildung 1: Schematischer Variantenauswahlprozess in der Angebotsphase <sup>0</sup>

Auf Grundlage von ZS1 wird mit der Konstruktion der Variante 1 (Var.1 in Abbildung 1) begonnen. Mit zunehmendem Reifegrad der ersten Variante (Var.1) kann der Fall eintreten, dass während des Konstruktionsprozesses die Unsicherheit steigt, ob die ursprünglich begonnene Variante tatsächlich die zielführende Lösung darstellt. Der Grund liegt an dem Konflikt, dass sich Bewertungszielgrößen (wie die Herstellkosten und das Gewicht) nicht auf Subsystemebene, sondern erst auf Gesamtsystemebene ergeben. Deshalb wird auf Basis eines zweiten Zielsystems (ZS 2) eine zweite Variante konstruiert. Um die bewertungsrelevanten Zielgrößen für die beiden Varianten frühzeitig ermitteln zu können, müssen daher frühzeitig größere Konstruktionsaufwände für die Ausdetaillierung der Lösungen getätigt werden. Erst auf dieser Basis kann die Kalkulationsabteilung einen Richtpreis für die Angebotsabgabe bestimmen. Zur besseren Veranschaulichung zeigt Abbildung 2 über die Phasen verteilte Konstruktionsaufwände am Beispiel eines Industrieprojektes.

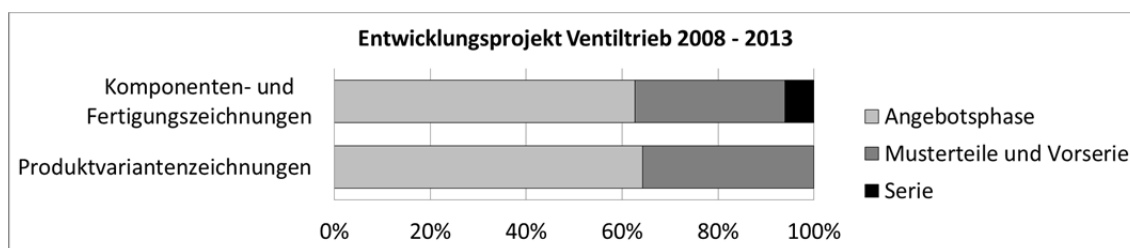


Abbildung 2: Prozentuale Verteilung der Konstruktionsaufwände am Beispiel eines Industrieprojektes

Gemäß der Abbildung 2 entfallen über 60% der Gesamtkonstruktionsaufwände auf die Angebotsphase. Weil nicht immer (wie im Beispielprojekt) ein Serienauftrag erteilt wird, ist die Wirtschaftlichkeit der Angebotsphase von großer Bedeutung. Hier setzt die Grundannahme an, dass durch Minimierung vermeidbarer Konstruktionsaktivitäten die Effizienz in der Anfragephase gesteigert werden kann. Um den Konstruktionsprozess in der Angebotsphase zu untersuchen und Maßnahmen zu dessen Effizienzsteigerung abzuleiten, wurden Interviews mit 18 Konstrukteuren aus drei Konstruktionsabteilungen durchgeführt.

## 2 Klärung der Problemsituation in der Praxis

Zur Klärung der Bedarfssituation in der industriellen Praxis wurden qualitative Interviewstudien in drei Konstruktionsabteilungen eines Automobil-Zuliefererunternehmens durchgeführt. Zwei Abteilungen beschäftigen sich mit Kolbensystemen für Verbrennungsmotoren (Produktgruppe 1), bei denen der Konstruktionsschwerpunkt auf der Detaillierung von Roh- und Fertigteilen liegt. Die dritte Konstruktionsabteilung bearbeitet Anfragen zu

Nockenwellensystemen (Produktgruppe 2). Im Gegensatz zur Produktgruppe 1, bei der Varianten durch Kombination von Konstruktionselemente abgeleitet werden, liegt bei der Produktgruppe 2 der Schwerpunkt auf den Kompatibilitäten unterschiedlicher Komponenten und Konstruktionselementen. Abbildung 3 zeigt hierzu die Anzahl der befragten Konstrukteure je Produktgruppe. Abbildung 4 beantwortet die Frage, ob es während ihrer Konstruktionsarbeiten zu vermeidbaren bzw. unnötigen Konstruktionsaktivitäten kommt.

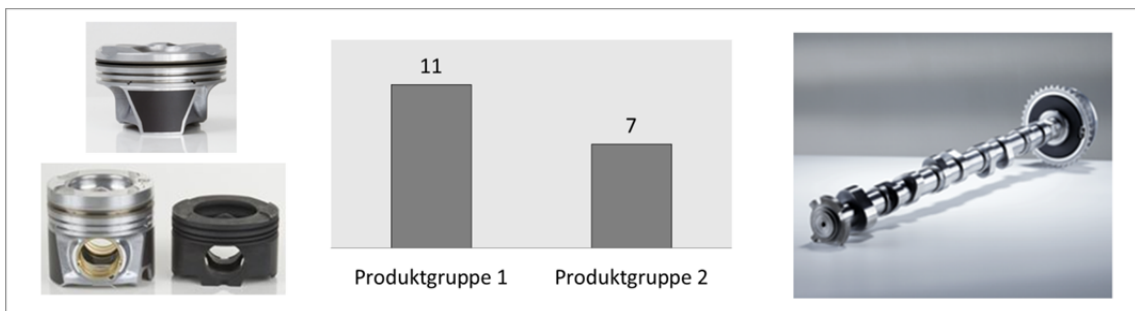


Abbildung 3: Anzahl der befragten Konstrukteure je Produktgruppe

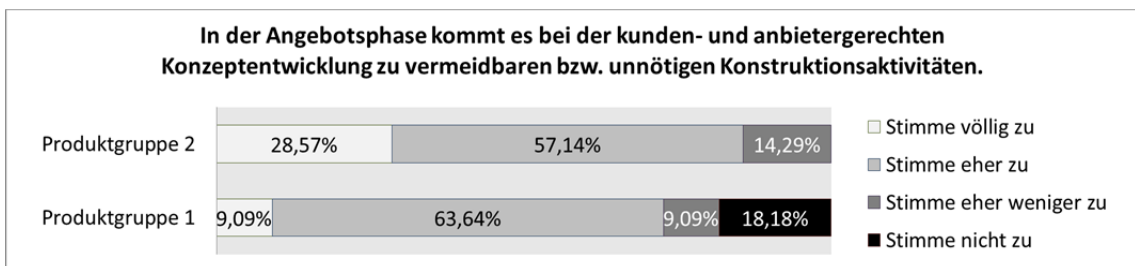


Abbildung 4: Vermeidbare Aktivitäten im Rahmen der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase

Bei beiden Produktgruppen sind die Konstrukteure der Auffassung, dass es in der Angebotsphase zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten kommt. Vermeidbare Aktivitäten werden hier als nicht zielführend für eine bestimmte aktuelle Anfrage verstanden. Aus den Interviews ging jedoch auch deutlich die Bedeutung von Erfahrungswissen hervor: Die Erkenntnis darüber, dass ein Design für die spezielle Anfrage nicht funktioniert hat, steht für kommende Anfragen zur Verfügung. Unnötig werden derartige Aktivitäten erst dann, wenn die gewonnenen Erkenntnisse durch ungenügende oder ausbleibende Dokumentation nicht für Folgeprojekte genutzt werden können. Die Problemstellung wie ein Konstrukteur passende Vorarbeiten für die zu lösende Aufgabe finden kann, steht hiermit direkt in Verbindung. Redundante, häufig wiederkehrende Konstruktionsaktivitäten sowie Vor- und Zurückänderungen sind nach Aussage einiger Studienteilnehmer darin begründet, dass es entweder schwierig ist, entsprechende Vorarbeiten zu identifizieren, oder dass die Lösun-

gen eines bestehenden Baukastens nicht ausreichend beschrieben sind, um sie für den speziellen Einsatzfall entsprechend bewerten zu können.

Im nächsten Schritt wurden die Konstrukteure gefragt, wodurch Zielkonflikte und Unsicherheiten verursacht werden und wie stark der Zeitdruck vermeidbare Konstruktionsaktivitäten während der Angebotsphase beeinflusst. Die Ergebnisse beider Produktgruppen sind in der nachfolgenden Abbildung 5 dargestellt.

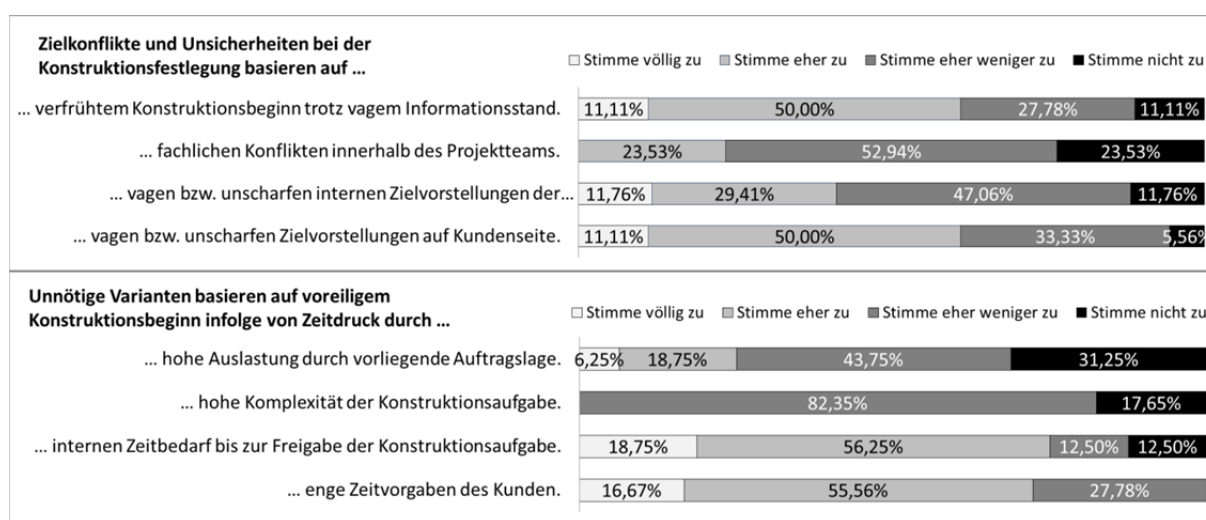


Abbildung 5: Ursachen von Zielkonflikten, Unsicherheiten und Zeitdruck

Nach Aussage der befragten Konstrukteure beeinflussen ein zu früher Konstruktionsbeginn sowie vage Zielvorstellungen des Kunden die Unsicherheit stärker, als fachliche Konflikte des Projektteams. In den Gesprächen mit Konstruktionsmitarbeitern wurde deutlich, dass ein voreiliger Konstruktionsbeginn zusätzliche Iterationen verursachen kann, weil sich z. B. mit zunehmendem Reifegrad des Ziel- und Objektsystems herausstellt, dass die auf Basis unscharfer Informationen gestartete Konstruktion die geforderten Zielwerte doch nicht erfüllen wird. Der Zeitdruck entsteht dabei durch enge Zeitvorgaben der Kunden und den Zeitbedarf für die Beauftragung einer Konstruktionsaufgabe.

Im Hinblick auf den Einfluss des Informationsaustauschs auf vermeidbare Konstruktionsaktivitäten wurden unvollständige Kundendaten und der interne Informationsfluss genannt, wobei letzteres zusätzlich den Zeitbedarf für die interne Konstruktionsfreigabe erhöht, vgl. Abbildung 5. Bei der intransparenten Ablage von Vorarbeiten sind in Abbildung 6 die Bewertungen nach Produktgruppe aufgeschlüsselt, da es hier deutliche Unterschiede gibt. Dies liegt an den unterschiedlichen Produkten. Die Produktgruppe 1 mit dem Schwerpunkt auf Roh- und Fertigteil je verkaufsfertigem Produkt stellt an die Dokumenta-

tion der Vorarbeiten andere Anforderungen als die Produktgruppe 2, bei der sich durch eine große Zahl an Komponenten entsprechend viele Varianten ableiten lassen.

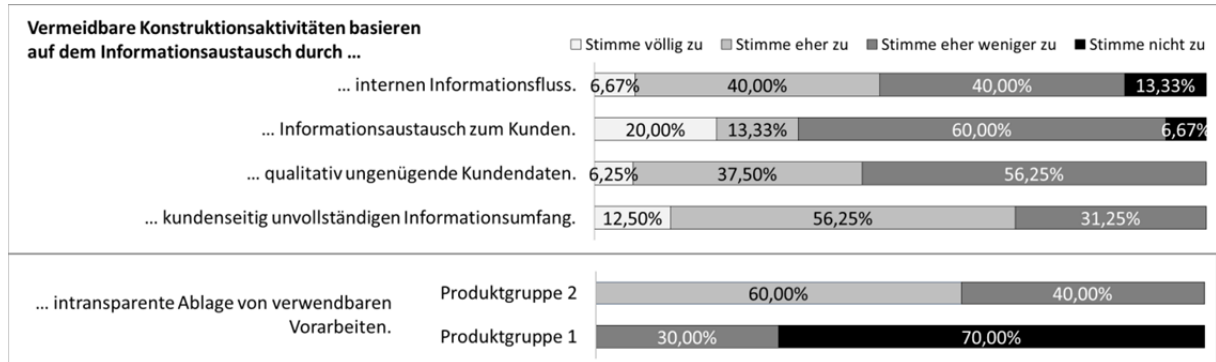


Abbildung 6: Einfluss des Informationsaustauschs auf vermeidbare Konstruktionsaktivitäten

Abbildung 7 zeigt, in welchem Umfang nach Einschätzung der Konstrukteure beider Produktgruppe die am Anfrageprozess beteiligten Abteilungen Änderungsaufträge erteilen.

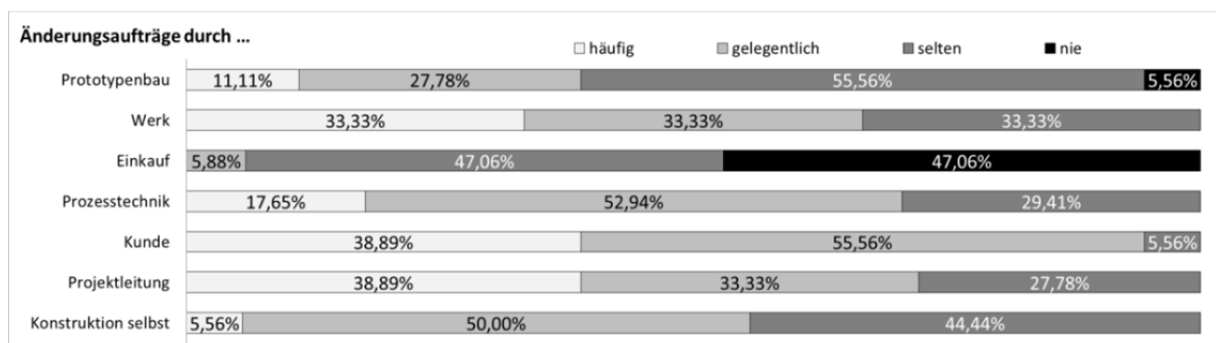


Abbildung 7: Auslöser von Änderungsaufträgen in der Angebotsphase

Nach Aussage der befragten Konstrukteure sind viele Iterationen auf den Kunden und die interne Projektleitung zurückzuführen. Die Projektleitung schlägt oft Konstruktionsvarianten vor, wobei diese in vielen Fällen auf den Kunden zurückgeführt werden können, da die Projektleitung durch den direkten Kontakt zum Kunden Änderungswünsche entsprechend weiterleitet. Änderungsaufträge werden ferner durch die produzierenden Werke und die Prozesstechnik ausgelöst. Änderungen an Fertigungsprozessen und der Einsatz anderer Herstellverfahren wirken sich auf die gesamte Konstruktion aus. Als Ursache hierfür wurde vielfach die Planung von Produkt- und Produktionssystem genannt – z. B. aufgrund eingeschränkter Möglichkeiten, funktionsbestimmende Prozess- und Produktzielgrößen zu einem frühen Zeitpunkt in der Angebotsphase bewerten zu können. Der Konflikt liegt darin, dass sich Bewertungszielgrößen wie z.B. Herstellkosten nicht auf Subsystemebene, son-



dern erst auf Gesamtsystemebene ergeben. Die Streuung der Bewertungen lässt sich dadurch begründen, dass die Konstrukteure neben unterschiedlichen Produkten auch unterschiedlichen Projekttypen (z. B. Vorentwicklungs-, Vorserien- und Serienprojekte) bearbeiten.

Abschließend wurde an beide Produktgruppen die Bedarfsfrage für eine Unterstützung gestellt, die von mehr als der Hälfte der Befragten mit „trifft völlig zu“ und „trifft eher zu“ beantwortet wurde, siehe Abbildung 8. Als Begründung für die Bewertungen „trifft eher weniger zu“ und „trifft nicht zu“ sind die individuellen Vorgehensweisen von Konstrukteuren, deren Berufserfahrung als auch die Komplexität des Produktes zu nennen.

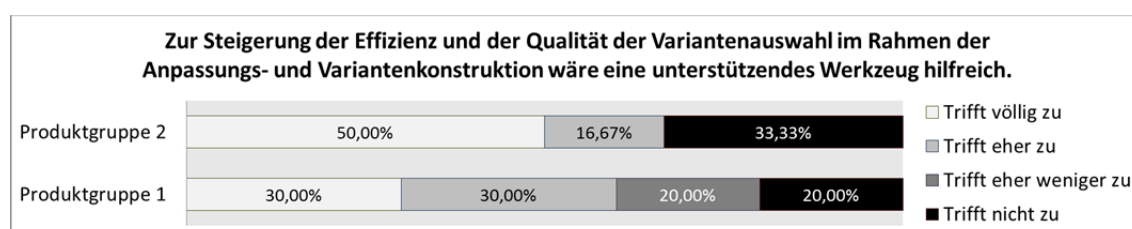


Abbildung 8: Unterstützendes Werkzeug zur Steigerung der Effizienz und der Qualität der Variantenauswahl

Zusammenfassend lässt sich festgehalten, dass der Hauptbedarf darin besteht, zu einem frühen Zeitpunkt in der Angebotsphase bestehende Lösungen bezüglich deren Eignung für neue Kundenanfragen hin bewerten zu können – noch bevor mit der eigentlichen Konstruktionstätigkeit begonnen werden muss. Vermeidbare Iterationen beim Konstruieren sind häufig auf den Kunden zurückzuführen. Dieser Faktoren ist jedoch entwicklungsmethodisch nur eingeschränkt beeinflussbar. Der gewählte Ansatz dieses Beitrags besteht eher darin, Konstrukteure bei der Variantenauswahl mittels nachvollziehbaren Lösungsempfehlungen zu unterstützen.

### 3 Zielsetzung

Die Herausforderung liegt darin, Baugruppenvarianten auf Grundlage von Zielgrößen zu bewerten, die sich nicht auf Einzelteilebene, sondern erst auf der zusammengebauten Systemebene ergeben. Das Ziel ist herauszufinden, wie die Elemente eines Grundbaukastens (bestehend aus Einzelteilen und Baugruppen) zu beschreiben sind, um sie für neue Kundenanfragen effizient einsetzen zu können. Hierzu muss zunächst geklärt werden, welches die relevanten Objekte sind und wie diese in wechselseitigen Beziehungen stehen. Des Weiteren soll untersucht werden,

- welche Zielgrößen und Eingangsinformationen nötig sind, um fundierte Lösungsempfehlungen ermitteln zu können und
- welche der erforderlichen prozess- und funktionsbestimmenden Parameter aktiv modellierbar sein sollen und welche sich passiv ergeben sollen.

Mit Hilfe dieser Fragestellungen soll ein Lösungsansatz zur Entscheidungsunterstützung 0 entwickelt werden, der implementiert in einem zukünftigen Entwicklungswerkzeug die Konstruktionsarbeiten in der Angebotsphase unterstützt.

#### 4 Lösungsansatz zur Entscheidungsunterstützung

Als wissenschaftliches Erklärungsmodell für die Beschreibung des Entscheidungsunterstützungssystems zur Variantenauswahl (VDSS, engl. Variant Decision Support System) 0 wird das erweiterte ZHO-Modell 0 herangezogen, welches Produktentstehung mittels drei interagierender Systeme, dem Ziel-, Handlungs- und Objektsystem, beschreibt. Der Mensch als Handlungssystem 0 steht dabei im Zentrum des iterativen Synthese- und Analyseprozess von Ziel- und Objektsystem, vgl. Abbildung 9.

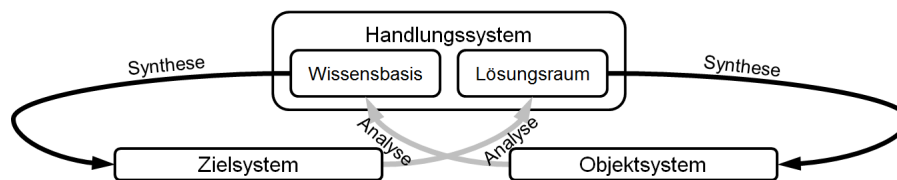


Abbildung 9: : Erweitertes ZHO-Modell 0

Konstrukteuren ist es in der Angebotsphase häufig nicht möglich, ein Zielsystem zu erstellen, das die Kunden- und die Anbieteranforderungen vollständig erfüllt. Ausgehend von der Wissensbasis wird ein erstes Zielsystem synthetisiert, das die Anzahl möglicher Lösungen reduziert. Durch Analyse des Lösungsraumes werden dann erste Varianten synthetisiert. Durch Analyse der Lösungen im Objektsystem werden diese hinsichtlich deren Eignung für die vorliegende Anfrage bewertet. Dieses Wissen ermöglicht dem Konstrukteur in einer weiteren Iteration die Konkretisierung des Zielsystems. Das ZHO-Modell bildet die Beschreibungsgrundlage für den hier vorgestellten Ansatz zur Entscheidungsunterstützung, denn es ermöglicht die Beschreibung eines iterativen Entwicklungsprozesses. Ebenso leiten die Autoren daraus den Ansatz ab, die Elemente eines Baukastens als korrespondierende Paare aus Ziel- und Objektsystem zu beschreiben. Anhand von Abbildung

10 wird der Ansatz erläutert, mit dem ein Entscheidungsunterstützungswerkzeug für die Variantenauswahl entwickelt werden soll:

Für die Ermittlung situationsgerechter Lösungsempfehlungen müssen zwei Schleifen durchlaufen werden. In der ersten Schleife (A bis K) werden auf Grundlage von Festforderungen ohne Toleranzbereich 0 (Funktionen, Verwendung) grundsätzlich geeignete Lösungen ermittelt, die in der zweiten Iteration (1 bis 11) bewertet werden.

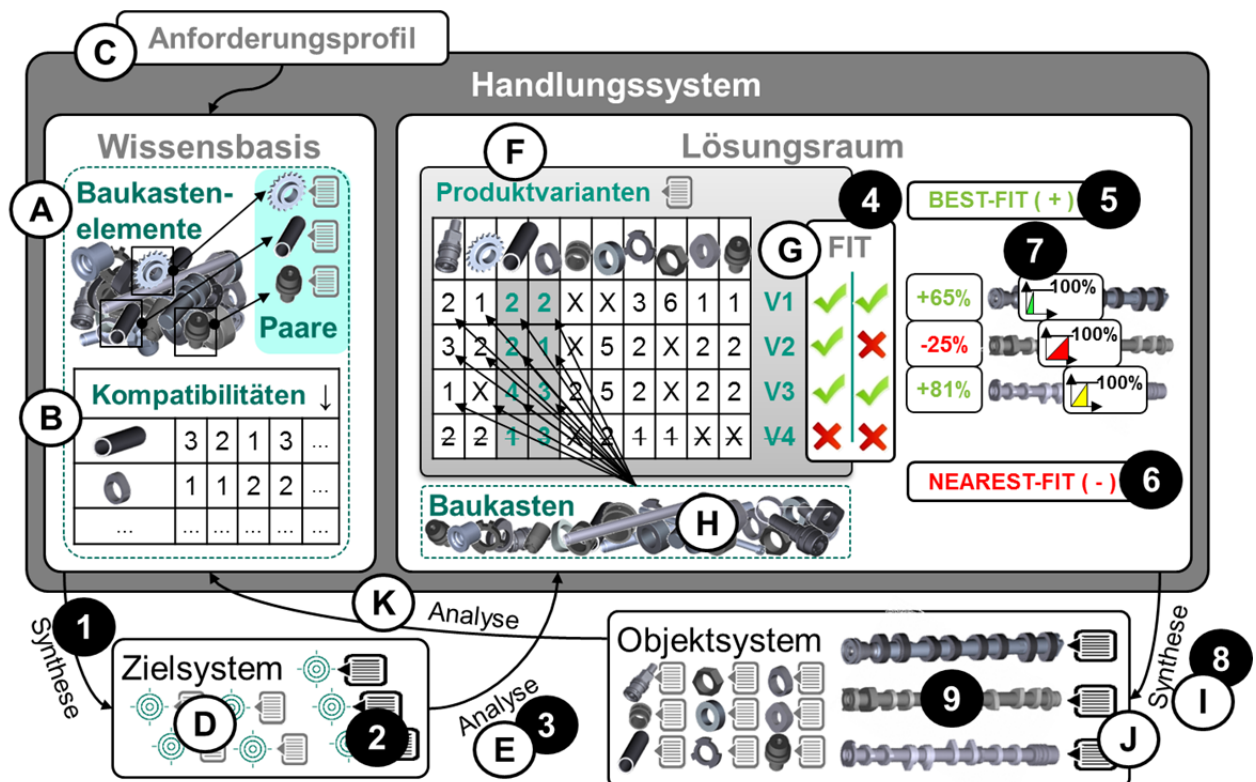


Abbildung 10: Entscheidungsunterstützungssystem

Die Wissensbasis enthält die Baukastenelemente (A) in denen die Konstruktionsabsichten vorangegangener Entwicklungsprojekte in Form von Paare aus Beschreibungen und korrespondierenden Lösungen gespeichert sind. Daneben sind die Baukastenelemente in Elementtypen klassifiziert (B), um im weiteren Verlauf auf die gültigen Elementkombinationen zu fokussieren. Die Typenbeschreibungen beinhalten die darstellbaren Funktionen sowie die Verwendungsmöglichkeiten (z. B. PKW- oder LKW-Anwendung, Standardanwendung oder reibleistungsreduzierte Variante). Auf Grundlage von Expertenwissen werden die produktspezifischen Regeln aufgestellt. Erweitert wird die Wissensbasis zusätzlich durch das kunden- und anbieterseitige Anforderungsprofil (C) sowie das Anwenderwissen.

Ausgehend von der aktuellen Situation, d.h. der Kunden- und Anbieteranforderungen, werden zunächst die Zielsystemseiten der korrespondierenden Paare synthetisiert (D), d.h., es erfolgt ein erster Abgleich zwischen den Zielen und den Elementbeschreibungen. In der sich anschließenden Analyse (E) werden gültigen Kombinationen von Elementtypen (Produktvarianten) ermittelt (F) und auf Basis von Festforderungen auf deren grundsätzliche Eignung für die aktuelle Anfrage hin analysiert (G). Bei den verbleibenden Varianten werden im Anschluss die Typen durch reale Produktlösungen aus dem Baukasten ersetzt (H), um hiernach die an die geometrischen Randbedingungen angepassten Objekte in Form von parametrischen CAD-Modell zu synthetisieren (I). Die Modelle der Varianten enthalten zu diesem Zeitpunkt bereits implizit geometriegebundene Bewertungszielgrößen (J), die durch den folgenden Analyse- (K) und Syntheseprozess (1) durch die angepassten Objektbeschreibungen ins Zielsystem expliziert werden (2) und für die vergleichende Bewertung zur Verfügung stehen.

Nachdem zu Beginn der zweiten Iteration im Zielsystem die objektbasierte Bewertungszielgrößen explizit vorliegen, können die Deckungsgrade der verbleibenden Varianten (V1 und V3) mit dem Anforderungsprofil analysiert werden (3). Zur Quantifizierung der Deckungsgrade wird ermittelt, ob eine Produkteigenschaft innerhalb eines geforderten Intervalls liegt 0. Am Beispiel der Bauteilmasse wird dieses Intervall nach oben durch eine Maximalforderung begrenzt, dessen Überschreiten zu einem Nichterfüllen der FIT-Bedingung führt (4; FIT = Passung). Daneben werden ertragbare Lasten durch Mindestforderungen begrenzt. Bei den hier zugrunde gelegten Bewertungszielgrößen handelt es sich um Produkteigenschaften, die durch den Entwickler nicht direkt festgelegt werden 0 und sich passiv durch Anpassung an die gegebenen funktions- und gestaltgebundenen Parameter ergeben. In diesem Zusammenhang quantifiziert die BEST-FIT-Bedingung (5), wie gut eine Variante für den aktuellen Anfragefall geeignet ist (V1 und V3) und die NEAREST-FIT-Bedingung (6) gibt Aufschluss darüber, wie weit die auf Grundlage passiver Zielgrößen nicht mehr geeigneten Varianten von den Kundenzielvorgaben entfernt sind (V2). Um neben Baukastenlücken auch Verbesserungspotentiale der verfügbaren Varianten zu erkennen, wird der Aufwand ermittelt, eine 100%-FIT-Bewertung für eine konfigurierbare Variante aus Lösungselementen des Baukastens zu erreichen (7).

Während die BEST-FIT- und NEAREST-FIT-Bedingung auf Gesamtsystemebene beurteilt werden können, erfordert die Ermittlung des Aufwandes für das Erreichen der 100%-Marke eine Betrachtung der Vernetzung der an die relevanten Anforderungen ge-

knüpften Merkmale und Eigenschaften der Baukastenelemente im Gesamtsystem. Der Aufwand, eine Produkteigenschaft zu ändern, ist dabei elementspezifisch unterschiedlich. Eine Erweiterung der Entscheidungsunterstützung durch den Vergleich der empfohlenen Varianten mit bewährten Lösungen ist in Planung, um eine variantenspezifische Risikoabschätzung zu ermitteln.

Die Bewertungsergebnisse werden abschließend über die Modellebene an die Wissensbasis übertragen. Folgen hiernach keine weiteren Anpassungen am Anforderungsprofil, so ergibt sich eine Überdeckung auf Ziel- (2) und Objektsystemseite (9). Gibt es jedoch weitere Änderungsaufforderungen, dann schließen sich weitere Iteration an. Dabei sind immer zwei Schleifendurchläufe erforderlich, bis sich Änderungen am Anforderungsprofil in entsprechenden Überdeckungsgraden auf Ziel- und Objektseite darstellen lassen. Für den Fall, dass keine geeignete Variante aus dem bestehenden Baukasten ermittelt werden kann, wird dies dem Anwender durch eine Rückmeldung des Programms mitgeteilt.

## **5 Ausblick auf die prototypische Realisierung**

An dieser Stelle wird ein kurzer Ausblick auf die prototypische Realisierung des Ansatzes gegeben. Es wird eine relationale Datenbank aufgebaut, mit der die Beziehungen für eine regelbasierte Bestimmung der gültigen Elementkombinationen abgebildet werden. Die unterschiedlichen Typen, z. B. von Antriebselementen oder Nockenwellenkörpern, wurden zuvor ermittelt. Die Merkmale und Eigenschaften der Komponenten und Systeme sind in separaten Tabellen abgelegt und durch Feldeinträge mit dem entsprechenden Typen verknüpft. Über eine Eingabemaske werden die relevanten Informationen erfasst und die zulässigen Kombinationen an Komponententypen ermittelt. Durch Zusammenbauregeln und Ersetzen der Typen durch Realteilentsprechungen werden Produktvarianten generiert. Für jede Variante werden Parametersätze erzeugt, die nacheinander in den Importbereich des CAD-Modells kopiert werden, um modellgebundene Rückgabewerte zu ermitteln. Diese werden dann in eine Berechnungstabelle exportiert und analysiert, um die in Kapitel 4 beschriebenen Kennwerte zu berechnen.

## **6 Fazit**

Im vorliegenden Beitrag wird ein Ansatz vorgestellt, der Konstrukteure bei der Varietenauswahl zur Konzeptentwicklung in der Angebotsphase unterstützt. Zur Klärung der

industriellen Bedarfssituation wurden Interviews durchgeführt. Dabei wurden die Einflussfaktoren und Charakteristika von vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten in der Angebotsphase bestimmt. Als eine der Hauptursachen für vermeidbare Iterationen wurde die schwierige Beurteilung von Zielgrößen bestimmt, die sich erst auf Systemebene ergeben. Für diese Problemsituation wird ein entwicklungsmethodischer Lösungsansatz und dessen prototypische Realisierung in einem Softwaretool vorgestellt. Das resultierende Entscheidungsunterstützungswerkzeug wird in kommenden Arbeiten weiterentwickelt und validiert werden. Dazu werden die Anforderungsprofile vergangener Entwicklungsprojekte herangezogen, um toolbasierte Lösungsempfehlungen zu generieren, um diese dann mit den Entscheidungen in den Projekten zu vergleichen.

## Literatur

- [1] Albers, A.; Walch, M.; Lohmeyer, Q.: *Zielsystemorientiertes Variantenmanagement einbaufertiger Systembaugruppen*. In 23. Symposium Design for X, DfX 2012, Bamberg, 2012.
- [2] Albers, A., Lohmeyer, Q.; Ebel, B.: *Dimensions of Objectives in Interdisciplinary Product Development Projects*. In 18th International Conference on Engineering Design ICED'11, Copenhagen, Denmark, Vol.2, pp.256-265, 2011.
- [3] Lohmeyer, Quentin: *Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2013.
- [4] Lindemann, Udo; Reichwald, Ralf; Zäh, Michael F. (Hrsg.): *Individualisierte Produkte – Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*. 1. Aufl. Berlin : Springer, 2006. – ISBN–10 3-540-25506-0.
- [5] Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung, Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 4. Aufl. München u. a.: Carl Hanser Verlag, 2009. – ISBN 978-3-446-42013-7.
- [6] Weber, Christian: *Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften – eine kritische Zwischenbilanz*. In 23. Symposium Design for X, DfX 2012, Bamberg, 2012.

# Theorie der Konstruktionsähnlichkeit bei der Bildung von geordneten Konstruktionsfamilien

Piotr Gendarz

Institut für Automatisierung und Integrierte Fertigungssysteme, Schlesische Technische Universität

ul. Konarskiego 18a, PL 44-100 Gliwice

E-Mail: [piotr.gendarz@polsl.pl](mailto:piotr.gendarz@polsl.pl); Internet: <http://www.polsl.pl>

**Inhalt:** Die Theorie der Konstruktionsähnlichkeit basiert auf der Theorie der physikalischen Ähnlichkeit. Das primäre Ziel dieser Arbeit ist eine derartige Auswahl von Konstruktionsmerkmalen in den einzelnen Typengrößen der Typenreihen, um identische: physikalische, stereomechanische aber auch einfache Zustände, wie in der Grundkonstruktion, zu erhalten. Die Grundaufzeichnungsform einer Konstruktion einer Typenreihe ist die programmierbare, grafische und relationale Parametrisierung.

**Abstract:** The theory of Constructional Similarity bases on the theory of physical similarity. The pattern construction is a model in the theory of constructional similarity. The essence of this work is to choose such constructional features of the new designed constructional means to obtain the identical states: physical, stereo mechanical or simple like in the pattern construction.

**Stichwörter:** die Konstruktionsmerkmale, die Typenreihen, die Konstruktionsähnlichkeit, die Grundkonstruktion, grafische und relationale Parametrisierung.

**Keywords:** constructional similarity, constructions families, parametrization.

## 1 Einleitung

Das praktische Ziel der Theorie der Konstruktionsähnlichkeit ist die Bildung von geordneten Konstruktionsfamilien. Ein Beispiel ist die Bildung einer Konstruktions-Typenreihe, die auf einer Musterkonstruktion und gemeinsamen vereinheitlichten Parametern basiert (siehe Abbildung 1). Neue Herausforderungen im Konstruktionsprozess gehen nicht nur in Richtung der Entwicklung neuartiger Konstruktionslösungen, sondern auch in Richtung ein größtmögliches Spektrum von Bedürfnissen für eine bestimmte Art von technischen Mitteln zu umfassen [2].

Nehmen wir zum Beispiel die Herstellung von Ösen, die eine Last von  $P_{a1}=4$  kN übertragen sollen und einen Durchmesser der Stange oder des Kolbens von  $P_{a2}=M16$  sowie einen Durchmesser der Ösenöffnung von  $P_{a3} = 16$  mm besitzen sollen. Aus marktwirt-

schaftlichen Gründen würde ein solches Produkt nur auf beschränktes Interesse stoßen. Wird hingegen eine geordnete Konstruktionsfamilie in Form einer Ösen-Typenreihe für die Bedürfnissphäre gebildet, die durch vereinheitlichte Parameter mit den Wertebereichen  $Pa1=0,9-8 \text{ kN}$ ,  $Pa2=M5-M30 \text{ mm}$  und  $Pa3=5-30 \text{ mm}$  gegeben seien, so gewinnt diese viel mehr an Aufträgen und entspricht besser den Anforderungen des Kunden, wodurch auch bessere Wettbewerbsfähigkeit am Markt vorliegt. Somit ist die Entwicklung von Konstruktionsmethoden, die auf der Grundlage einer einzigen Konstruktion eine rationale Typenreihe mit einer konstanten Gestalt, aber mit veränderlichen Abmessungen aufbauen, begründet. Basierend auf dieser Grundlage läuft die Qualität-Quantität Fragenstellung auf eine Quantität Fragenstellung hinaus, d.h. für welche vereinheitlichten Parameter  $pa_{ia}^u$  optimale Abmessungswerte ausgewählt werden sollen  $w_{il}^{e_j} (j = 1, jz)$ .

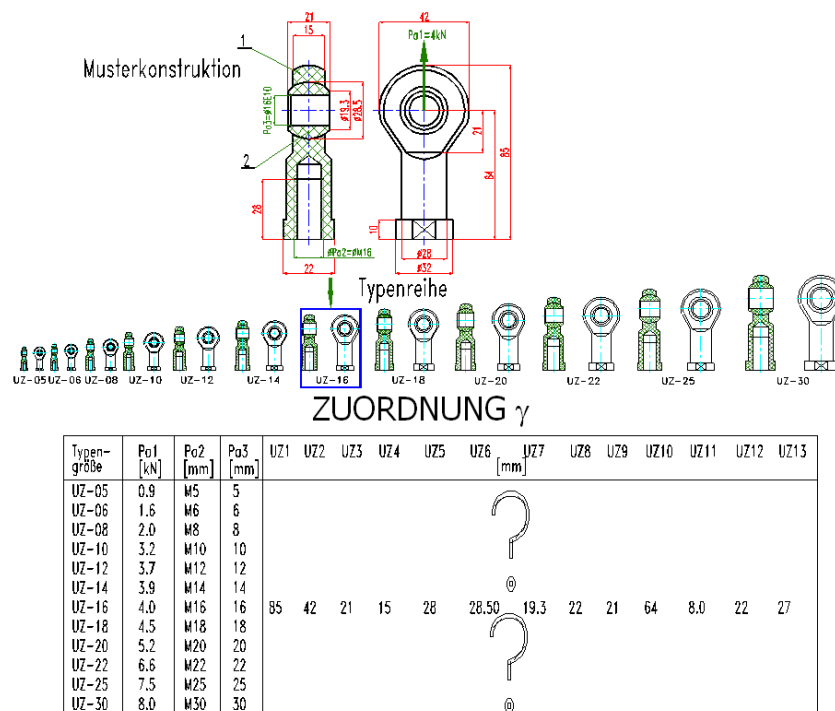


Abbildung 1: Konstruktions-Typenreihe gebildet auf der Basis einer Musterkonstruktion

Die Zuordnung im Prozess der Bildung von geordneten Konstruktionsfamilien (Typenreihen, Modulsystemen) wird als Zuordnung  $\gamma[1, 3]$  bezeichnet,

$$pa_{ia}^u \rightarrow w_{il}^{e_j} (j = 1, jz) \quad (1)$$

Die Methode der Bildung einer geordneten Konstruktionsfamilie auf der Basis der Konstruktionsähnlichkeit unterscheidet folgende Phasen:

- Auswahl, Überprüfung und Änderung der Musterkonstruktion,



- Vereinheitlichen der Parameter für eine geordnete Familienkonstruktion,
- Aufzeichnung der Konstruktion mit variabler Abmessungsanordnung,
- Schaffung von Voraussetzungen für die Ähnlichkeit von Parametern und Abmessungen,
- Berechnung und Überprüfung der Abmessungswerte von Element-Typenreihen,
- parametrische Konstruktionsaufzeichnung.

## 2 Musterkonstruktion

Die Musterkonstruktion ( $ks_0$ ) ist eine bereits überprüfte Konstruktion im Hinblick auf die Funktion (Funktionssimulation mittels CAD), Optimierung (Festigkeitsanalyse mittels CAE) und Fertigung (Fertigungssimulation mittels CAM). Eine Musterkonstruktion ist auch bereits experimentell untersucht (Prototypuntersuchungen). Eine Konstruktion kann als eine Musterkonstruktion angenommen werden, wenn sie die Kriterien für eine experimentelle Untersuchung bestmöglich erfüllt. Aufgrund der Berechnungsgenauigkeit der Abmessungswerte mittels der Methode der Konstruktionsähnlichkeit, wird als Musterkonstruktion eine Konstruktion aus dem mittleren Bereich der geordneten Parameter empfohlen. Es wird zwischen zwei Erstellungsmöglichkeiten für Musterkonstruktionen unterschieden:

1. durch Auswahl aus einer existierenden Konstruktionsmenge, die bereits eine Produktionsbasis bildet und deren hergestellte Anwendungsanforderungen erfüllt,
2. Anwendung der Variantenanalyse für eine neu zu erstellende Musterkonstruktion.

Im ersten Fall sind die Hauptziele der Musterkonstruktionsauswahl die Erweiterung des Angebots (des Bedarfs) einer bereits gefertigten Klasse von technischen Objekten. Zunächst wird eine praktische Beurteilung der bestehenden Konstruktionslösungen durch verschiedene Experten durchgeführt: Planer, Konstrukteure, Technologen, Ökonomen, Hersteller, Anwender und Instandhaltungs-Techniker. Auf dieser Grundlage wird die optimale Wahl getroffen, eventuell eine Konstruktionsmodifikation durchgeführt und somit die Musterkonstruktion  $ks_0$  gebildet. Ein Beispiel sind ausgewählte Musterkonstruktionen von Kolbestangeführungen, die in hydraulischen Zylindern für Bergbaumaschinen angewendet werden (Abb. 2a). Das Ergebnis der Bewertung und Auswahl sind Musterkonstruktionslösungen der Kolbestangeführungen (Abb. 2b). Durch den Einsatz der gleichen Verfahrensweise für die restlichen Baugruppen des hydraulischen Zylinders wurden Musterkonstruktionen abgeleitet, wie in der Abb. 2c dargestellt.

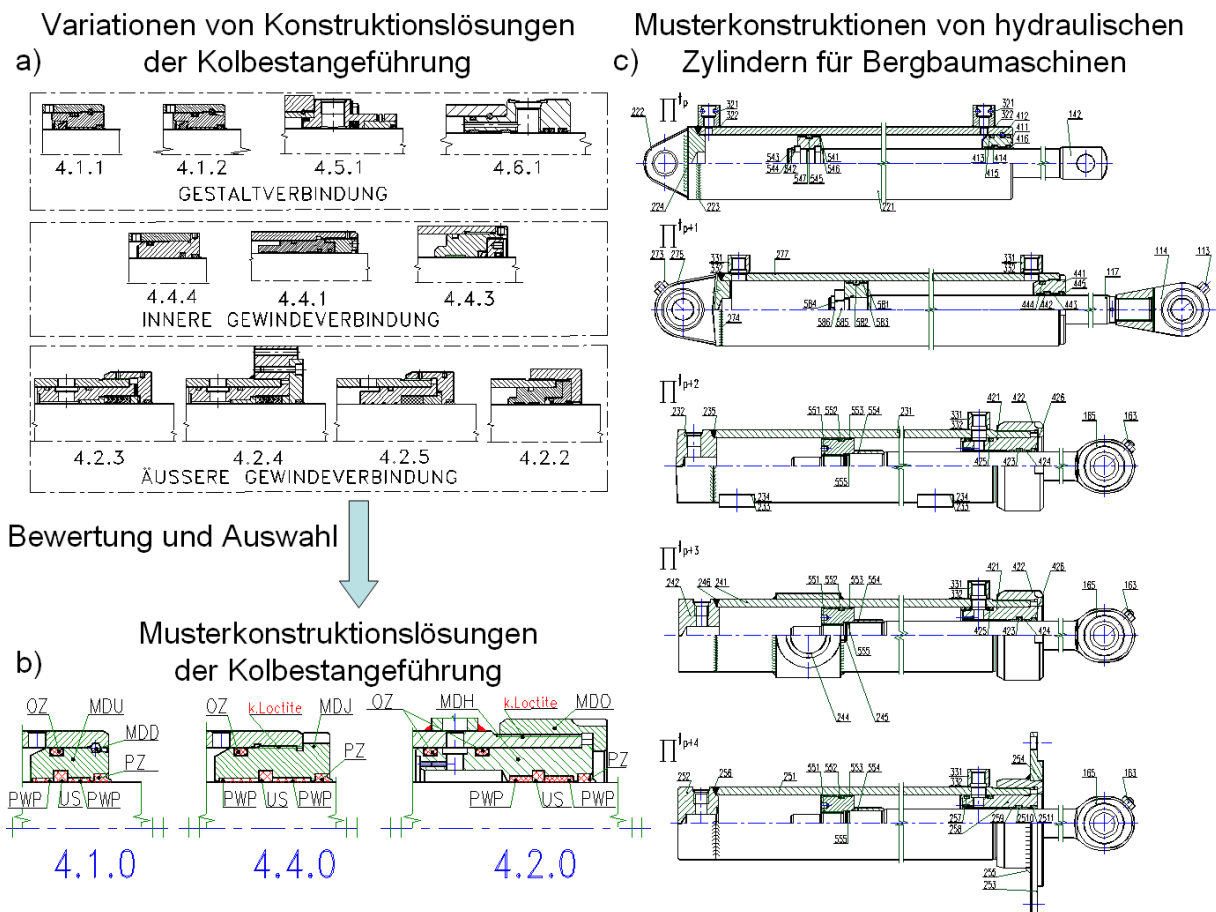


Abbildung 2: Bildung von Musterkonstruktionen für hydraulische Zylinder

Ein besonderes Werkzeug zur Bildung von Musterkonstruktionen für eine neu zu erstellende, geordnete Konstruktionsfamilie (vorlaufende Ordnung) ist der Einsatz der Variantenanalyse [5], die beispielsweise im I-DEAS Programm entwickelt wird.

Bei der Variantenanalyse wird die Methode der finiten Elemente angewendet die zusätzlich um folgendes erweitert ist:

- Sensitivitätsanalyse – es werden relevante Element-Abmessungen im Hinblick auf den Spannungs- und Verzerrungszustand sowie auch auf die Masse ausgewählt.
- parametrische Analyse – für vorgegebene Bereiche der relevanten Abmessungswerte werden optimale Werte bestimmt [5] im Hinblick auf zulässige Spannungen, Verschiebungen, Verformungen und minimale Masse.

Ein Beispiel für die Anwendung der Variantenanalyse ist die Bildung einer Musterkonstruktion von Greifbacken eines Greifers. Das Ausgangsmodell wurde in der Abb. 3a dargestellt. Anhand der Ergebnisse der Variantenanalyse (Abb. 3b und 3c) konnte eine optimale Musterkonstruktion erhalten werden (Abb. 3d).

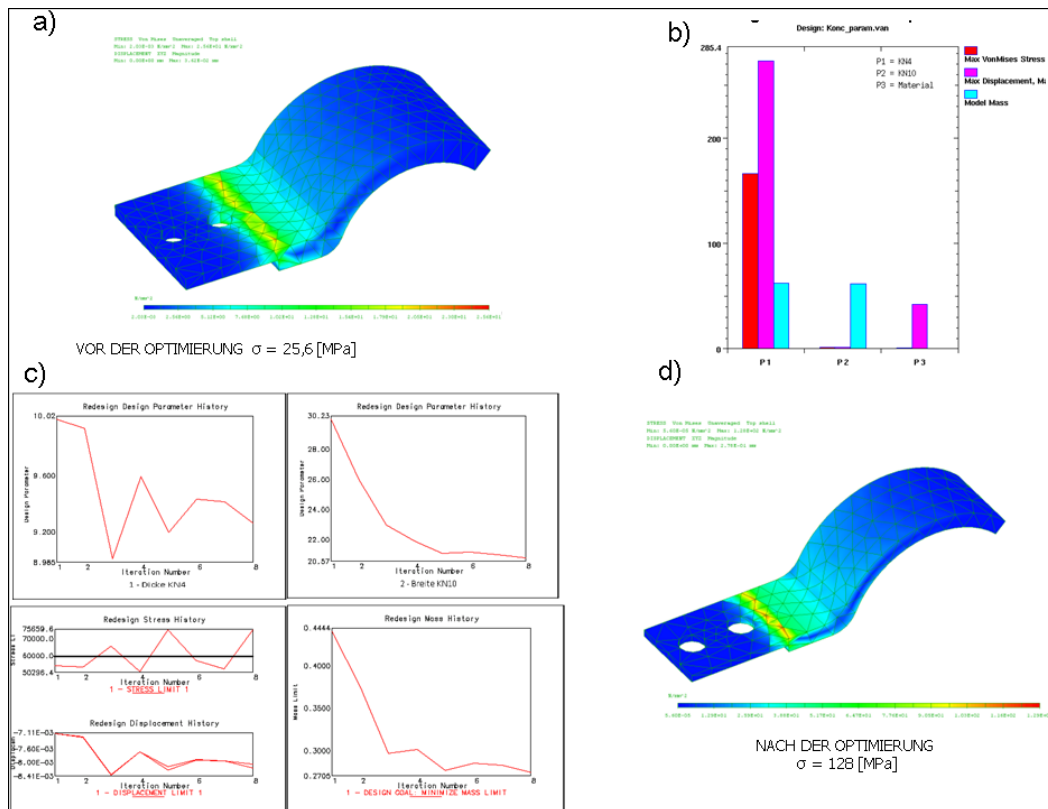
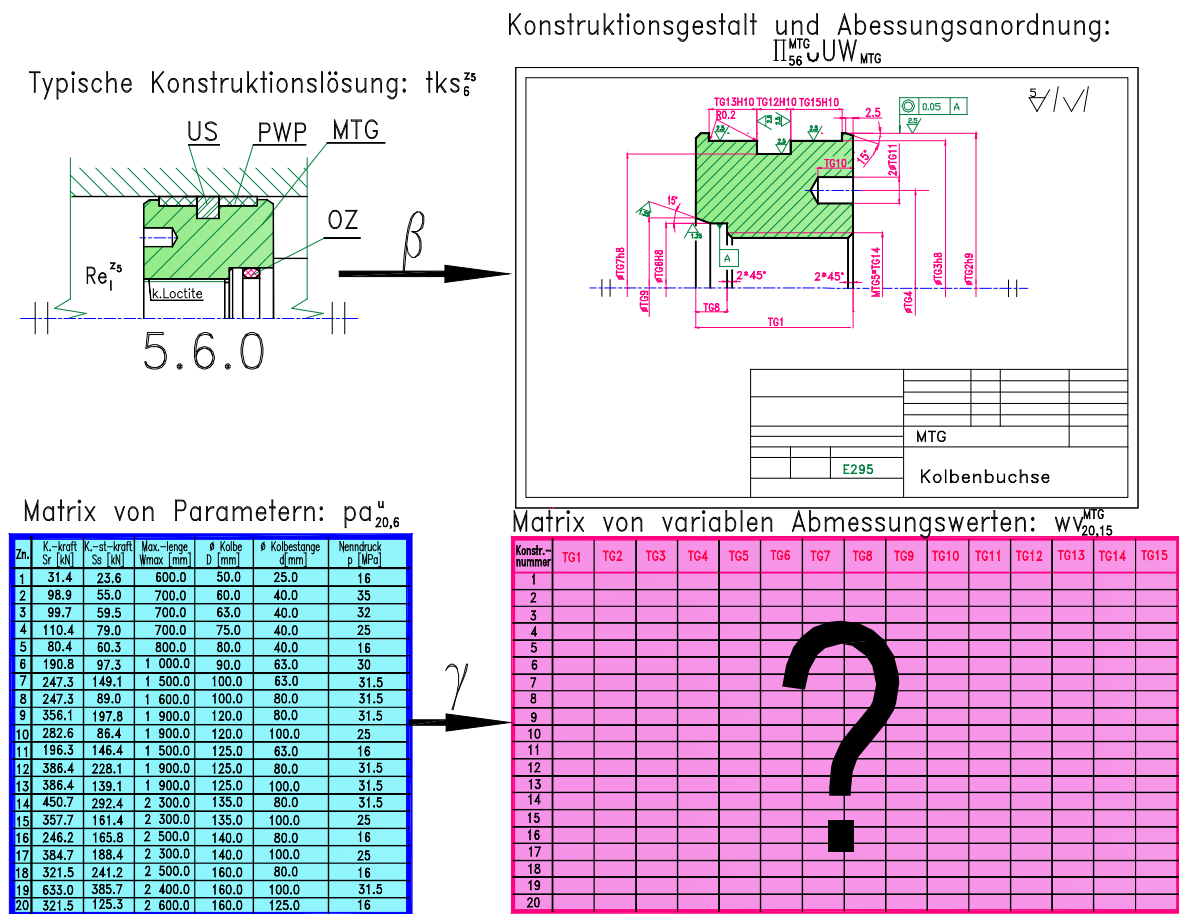


Abbildung 3: Variantenanalyse von Greifbacken eines Greifers

In der Musterkonstruktion wurden höhere Spannungen zugelassen, die die kritische Spannung, die Streckgrenze nicht überschritten. Somit konnte infolge der höheren Materialausschöpfung die Elementmasse um 65% reduziert werden.

### 3 Vereinheitlichung und Aufzeichnung von Konstruktionen mit einer Variablenabmessungsanordnung

Quantitative, charakteristische Familienkonstruktions-Merkmale wurden als Parameter  $Pa_a^u$ ; ( $a = 1, az$ ) bezeichnet. Die Elemente der Parametermatrix  $pa_{ia}^u$  sind unabhängige Variable bei der Bestimmung der quantitativen Konstruktionsmerkmale von Elementen  $x_{ia}^u = pa_{ia}^u$  [1, 4]. Die Auswahl der Konstruktionsmerkmale von Elementen wird aufgrund des Bedürfnisses  $po_i^u$  vorgenommen, das durch die Zeile der Parametermatrix repräsentiert wird, die aus sogenannten vereinheitlichten Parametern gebildet wird.



Aufgrund der Parameterwerte werden quantitative Konstruktionsmerkmale (Abmessungswerte und Materialkennwerte) der einzelnen hergestellten Elemente  $e_j$   $y_{il}^{e_j} (l = 1, l_{vj})$  ausgewählt. Die Bedürfnissphäre der Konstruktionsfamilie wird durch vereinheitlichte Parameterwerte, also durch beschränkte und geordnete Parameterwerte, die über eine bestimmte Zeit angenommen werden, beschrieben. Die Werkzeuge zur Generierung von vereinheitlichten Parametern sind: Prognose, Anpassung der Parameterwerte an eine Normalreihe, Adaptation der Parameter an zusammenwirkende Parameter von technischen Objekten [6, 7]. Ein Beispiel für vereinheitlichte Parameter eines Hydraulikzylinders, als unabhängige Variablen der Zuordnung  $\gamma$ , zeigt die Abbildung 4. Der Zuordnung  $\gamma$  geht die Zuordnung  $\beta$  voraus, die auf der Zerlegung der typischen Konstruktionslösungen beruht und typische Element-Konstruktionsformen mit Abmessungsanordnung generiert. In der Abmessungsanordnung werden die variablen Abmessungen durch Buchstaben und Nummern bezeichnet. Zum Beispiel: Für das Element MTG heißen die Bezeichnungen TG1 – TG15 (Abb. 4).

## 4 Bedingungen der Konstruktionsähnlichkeit

Die Methode zur Auswahl von Abmessungswerten auf der Basis der Konstruktionsähnlichkeit hat ihre Ursprünge in der Theorie der physikalischen Ähnlichkeit [7]. Die physischen Modelle wurden in einem entsprechenden Maßstab erstellt und getestet, so dass komplexe physikalische Phänomene gut simuliert werden konnten. Auf dieser Grundlage wurden neue Konstruktionen technischer Objekte geschaffen. Zum Beispiel wurden für ein Flugzeugmodell im entsprechenden Maßstab in einem Windkanal die geometrische Form des Rumpfs und seine Abmessungsverhältnisse modifiziert. Im Prozess der Generierung von geordneten Konstruktionsfamilien mit der Anwendung der Konstruktionsähnlichkeit entspricht dem Modell: die Musterkonstruktion  $ks_0\{y_{ol}^{e_j}; (l=1, lv_j)(j=1, jz)\}$  mit den Musterparametern  $\overline{X}_0\{x_{0a}; (a=1, az)\}$ . Auf ihrer Basis werden geometrisch ähnliche Konstruktionen geschaffen  $ks_i\{y_{il}^{e_j}; (l=1, lv_j)(j=1, jz)\} \in RK_n$ , entsprechend zu den unifizierten Parametern  $\overline{X}_i^u\{x_{ia}^u; (i=1, iz)(a=1, az)\}$ , die in diesen identische Relationskopplungen und Umwandlungsrelationen erfüllen (Abb. 5).

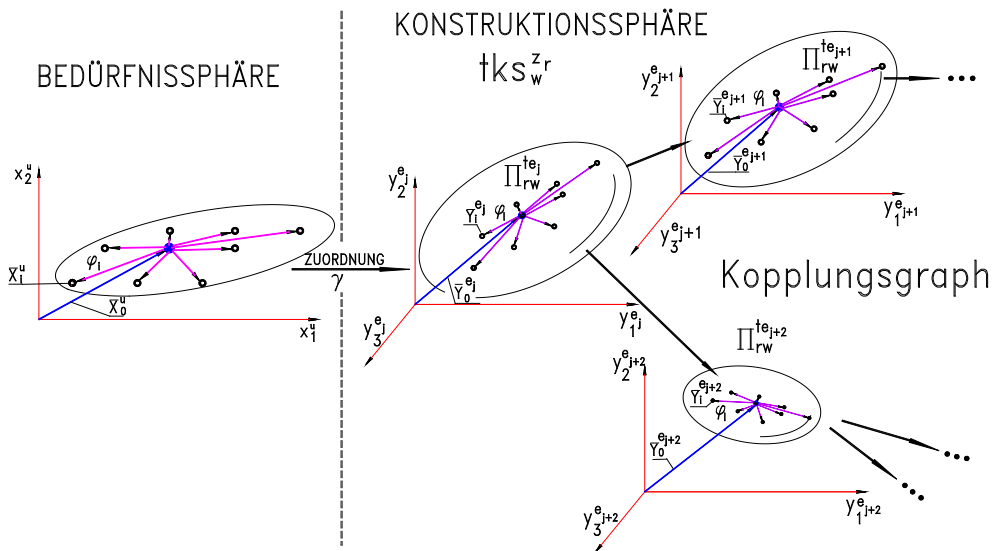


Abbildung 5: Modell für quantitative Wahl von Konstruktionsmerkmalen basierend auf der Konstruktionsähnlichkeit

Es wurden zwei grundlegende Ähnlichkeitszahlen zwischen den Konstruktionsmerkmalen der neuen Konstruktion  $ks_i$  und der Musterkonstruktion  $ks_0$  definiert:

Parameterähnlichkeitszahl

$$\varphi_a^u = \frac{x_{ia}^u}{x_{0a}} \quad (2)$$

Abmessungsähnlichkeitszahl

$$\varphi_l^{e_j} = \frac{y_{il}^{e_j}}{y_{ol}^{e_j}} \quad (3)$$

In der Theorie der Konstruktionsähnlichkeit werden die Konstruktionsmerkmale gewählt, um Relationskopplungen und Umwandlungsrelationen des Systems in einer neuen Konstruktion zu erhalten (Abbildung 6a), die denen der Musterkonstruktion entsprechen und somit optimal unterschiedliche Konstruktionsmengen bilden. Isomorphen Relationskopplungen und Umwandlungsrelationen, die in der Systemstruktur von Konstruktionsfamilien hervorgehoben sind, werden phänomenologische Modelle und physikalische Abhängigkeiten, die mit mathematischen Funktionen beschrieben werden, zugeordnet (Abb. 6b).

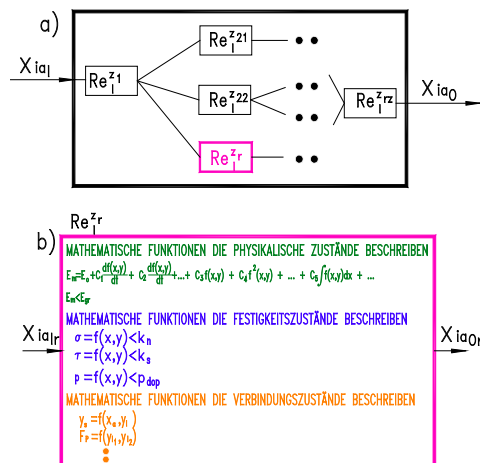


Abbildung 6: Mathematische Beschreibung der zukünftigen Zustände eines technischen Mittels

Werden identische Zustände beibehalten: physikalische, stereomechanische und einfache, beschrieben jeweils mittels mathematischer Funktionen für einzelne Relationen der Systemstruktur der Konstruktionsfamilie, so werden **die Bedingungen der Konstruktionsähnlichkeit** gebildet [7]. Diese Bedingungen werden als Grundlage für die Berechnung der Konstruktionsmerkmale  $y_{il}^{e_j} (l = 1, l_{vis}) = f_p(x_{ia}^u)$  herangezogen. Die Werte der Konstruktionsähnlichkeit für die folgenden, angenommenen Ähnlichkeitszahlen: Kraft  $\varphi_F$ , Drehmoment  $\varphi_{Mo}^u$ , Fläche  $\varphi_A$ , Volumen  $\varphi_V$ , Widerstandsmoment  $\varphi_W$ , Massenträgheitsmoment  $\varphi_J$ , etc. werden in der Funktion der Abmessungsähnlichkeit  $\varphi_l$  bestimmt. Hingegen betreffen die Konstruktionsähnlichkeitszahlen  $\varphi_l$  die quantitativen Konstruktionsmerkmale bei der Voraussetzung einer konstanten Konstruktionsgestalt  $\Pi$  [3]. Für die an-

genommene Ähnlichkeit der Querschnittsfläche  $\varphi_A$ , z. Bsp. eines Quadrates der Seitenlänge  $l$ , mit einer Seitenlängenähnlichkeit  $\varphi_l$  ergibt sich:

$$A = l^2, \quad \varphi_A = \left(\frac{l_i}{l_o}\right)^2 = \varphi_l^2 \quad (4)$$

Der Zusammenhang in der Gleichung (4) gilt auch für andere Querschnitte: Rechteck, Ellipse, etc., vorausgesetzt, dass alle Querschnittsabmessungen gleichmäßig wachsen also einer vollen Abmessungsähnlichkeit entsprechen. Die Bedingung der Ähnlichkeit der Querschnittsfläche bedeutet, dass zum Beispiel eine zweifache Änderung eines Wellendurchmessers  $\varphi_l = 2$  eine vierfache Erhöhung des Querschnittes bewirkt,  $\varphi_A = 4$ . Verallgemeinernd werden folgende Beziehungen unterschieden (Tabelle 1).

Tabelle 1 Grundsätzliche Beziehungen zwischen Ähnlichkeitszahlen [7]

| Größe                                       | Bezeichnung                    | Ähnlichkeitsmaßstab |
|---|--------------------------------|---------------------|
| Drehzahl                                    | $\varphi_n$                    | $\varphi_l^{-1}$    |
| Winkelgeschwindigkeit                       | $\varphi_\omega$               |                     |
| Geschwindigkeit                             | $\varphi_v$                    | $\varphi_l^0 = 1$   |
| Infolge Elastischer- und Trägheits- Kräfte: | $\varphi_\varepsilon$          |                     |
| Dehnung                                     | $\varphi_\sigma, \varphi_p$    |                     |
| Spannung, Flächenpressung                   |                                |                     |
| Elastische Verformung,                      | $\varphi_{\Delta l}$           | $\varphi_l^1$       |
| Federsteifigkeit                            | $\varphi_c$                    |                     |
| Infolge Schwerkraft:                        |                                |                     |
| Dehnung,                                    | $\varphi_\varepsilon$          |                     |
| Spannung, Flächenpressung                   | $\varphi_\sigma, \varphi_p$    |                     |
| Kraft                                       | $\varphi_F$                    | $\varphi_l^2$       |
| Fläche                                      | $\varphi_A$                    |                     |
| Volumen                                     | $\varphi_V$                    | $\varphi_l^3$       |
| Gewichtskraft                               | $\varphi_G$                    |                     |
| Drehmoment                                  | $\varphi_{M_S}$                |                     |
| Widerstandsmomente                          | $\varphi_{W_X}, \varphi_{W_0}$ |                     |
| Flächenträgheitsmomente                     | $\varphi_{I_X}, \varphi_{I_0}$ | $\varphi_l^4$       |
| Massenträgheitsmomente                      | $\varphi_{J_X}$                | $\varphi_l^5$       |

Der Grundzustand einer neuen Konstruktion, der der Musterkonstruktion gleichen sollte, ist der stereomechanische Zustand, wo identische Spannungen  $\varphi_\sigma = 1$  herrschen. In Anbetracht einer einfachen Zugspannung in einem Element, hervorgerufen durch die statische Kraft  $F$  (ohne Eigengewicht), wird die Spannung aus dem folgenden Verhältnis bestimmt [7]:

$$\sigma = \frac{F}{A} \leq \sigma_{dop}$$

Die Spannungsähnlichkeitszahl in der Typenreihe (Modulreihe) beträgt,

$$\varphi_{\sigma} = \frac{\sigma_i}{\sigma_0} = \frac{F_i \cdot A_o}{F_0 \cdot A_i} = \frac{\varphi_F}{\varphi_A} = \frac{\varphi_F}{\varphi_l^2} = 1,$$

daraus folgt,

$$\varphi_F = \varphi_l^2 \quad (5)$$

Die Parameterwerte wie auch die Werte der quantitativen Konstruktionsmerkmale der Elemente, auf der Grundlage der Bedingungen der Konstruktionsähnlichkeit, können über folgende Beziehungen berechnet werden:

- vereinheitlichte Parameterwerte:  $x_{ia} = x_{0a} \cdot (\varphi_{il}^u)^i, \quad (6)$

- Abmessungswerte:  $y_{il}^{e_j} = y_{0l}^{e_j} \cdot (\varphi_{il}^{e_j})^i, \quad (7)$

Wobei gilt:

$x_{0a}$  - a-ter Musterparameterwert,

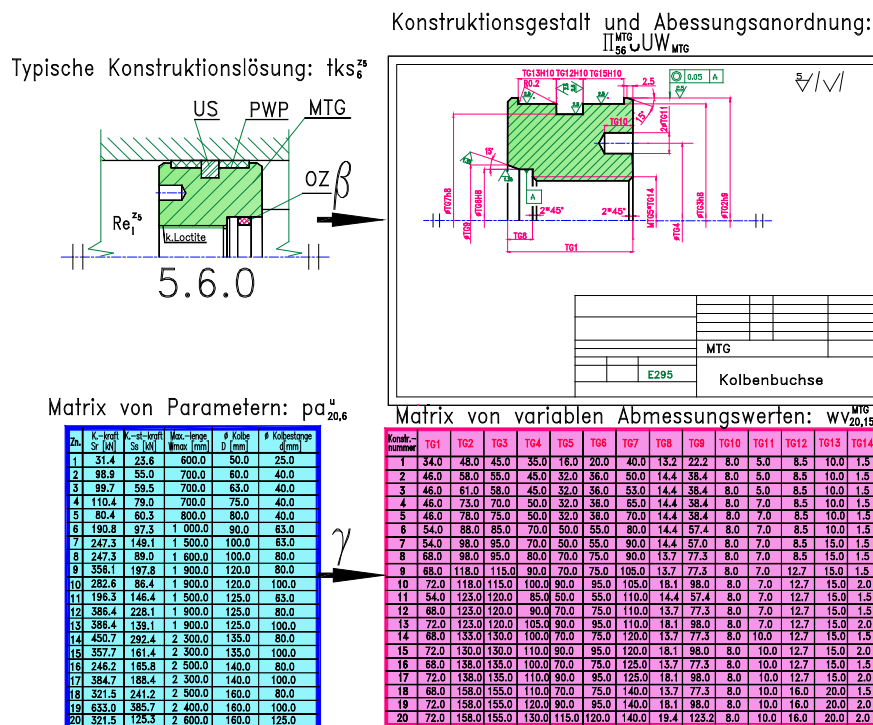
$y_{0l}$  - l-ter Abmessungswert der Musterkonstruktion,

i – Exponentenwert der die Entfernung von der Musterkonstruktion beschreibt

(i=...-2, -1, 0, 1, 2..., i=0 – entspricht der Musterkonstruktion).

Die Parameter- und Abmessungswerte können, wie oben gezeigt, analytisch berechnet bzw. mittels Nomogrammen mit einer logarithmischen Koordinatenskala grafisch bestimmt werden. Das Ergebnis bilden die Abmessungswerte, die auf der Grundlage der Konstruktionsähnlichkeit gewonnen werden und zusätzlich modifiziert sind auf Basis der Anpassung an die Abmessungen von Katalog- und Normteilen. Beispiele sind die Abmessungswerte einer Kolbenbuchse, gezeigt in der Abbildung 7.



Abbildung 7: Ergebnis der Zuordnung  $\gamma$ 

## 5 Parametrische Konstruktionsaufzeichnung

Die Parametrisierung ist eine spezielle Form der Konstruktionsaufzeichnung, adaptiert an die Aufzeichnung von Typenreihen einer Konstruktion (Modulreihe), die sich durch eine gleichbleibende Konstruktionsform  $II$  und durch veränderliche Abmessungswerte  $W$  charakterisieren. In grafischen Programmen wird zwischen dynamischer, relationaler, programmierbarer und grafischer Parametrisierung unterschieden. Im Prozess der Bildung von geordneten Konstruktionsfamilien, mit der Methode der Konstruktionsähnlichkeit, konnten die besten Ergebnisse bei der programmierbaren, grafischen und relationalen Parametrisierung erreicht werden.

**Programmierbare Parametrisierung** nutzt eine Programmiersprache und ein Grafikprogramm, durch welches diese Sprache angewendet. Beispiele sind die Programmiersprache AutoLISP im grafischen Programm AutoCAD oder die Programmiersprache GRIP im fortgeschrittenen Grafikprogramm NX. Die Aufzeichnung der Elementkonstruktion läuft auf die Bildung einer Parametrik in der AutoLISP-Sprache hinaus (Abb. 8c), in der Berechnungen hinsichtlich der Bestimmung von Abmessungswerten, mit der Anwendung der Bedingungen der Konstruktionsähnlichkeit, unternommen werden. Anschließend, durch die Nutzung der Befehle des graphischen Programms, wird eine Konstruktionsaufzeich-

nung, basierend auf den Koordinaten der charakteristischen Konturpunkte, gebildet (Abb. 8b). Diese Koordinaten werden mittels der Funktion der variablen Abmessungen  $TG_i$  (Abb. 8a) beschrieben. Allgemein kann geschrieben werden:

$$\langle x_n, y_n \rangle = f(y_{il}^{te_j}). \quad (8)$$

Die Berechnung der Punktekordinaten beginnt mit dem sogenannten Basispunkt  $pb$ , (Abb. 8b). Wenn auf der Zeichnung mehrere Projektionen (Ansichten, Teilansichten, Schnittansichten, Teilschnittansichten, Detailansichten) dargestellt werden, dann sind auch mehrere Basispunkte vorhanden. Die Basispunkte beschreiben die Anordnung der Projektionen auf dem Zeichnungsblatt und können durch die Verwendung des angenommenen Zeichenblattformates und des Maßstabes bestimmt werden. Ausgehend vom Basispunkt werden die Koordinaten der charakteristischen Punkte der Aufzeichnung der gegebenen Projektion mittels der Abmessungsfunktion Punkt für Punkt bestimmt (Abb. 8c).

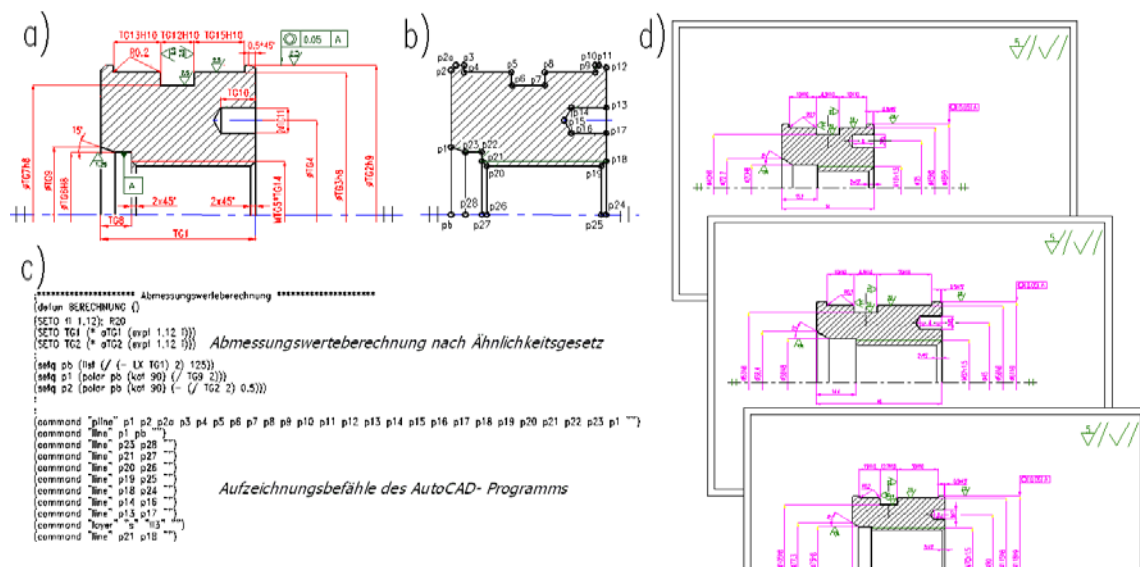


Abbildung 8: Aufzeichnung eines MTG-Element-Grundrisses in einer Parametrik

Wird die Parametrik im grafischen Programm ausgeführt, so wird eine Aufzeichnung der Elementkonstruktion für eine ausgewählte Typengröße in Form einer Fertigungszeichnung generiert (Abb. 8d).

In der **grafischen Parametrisierung** ist die Kenntnis einer Programmiersprache nicht erforderlich, es werden die entsprechenden Möglichkeiten des graphischen Programms genutzt. Eine derartige Form der Parametrisierung findet in graphischen Programmen, wie I-DEAS NX oder Unigraphics NX (NX), Anwendung. Zunächst wird hier ein 3D-Modell der Musterkonstruktion erstellt (Abb. 9).



Abbildung 9: 3D-Modell der Musterkonstruktion

Während der Bildung eines 3D-Modells werden Abmessungswerte gewählt, die für ein Mustermodell optimal sein sollten. Jedes Abmaß erhält einen Identifizierungscode, der aus Buchstaben (in der Regel aus zwei Buchstaben) und Nummern besteht. Die Reihenfolge in der die Nummern vergeben werden, sollte mit den Gesamtabmessungen beginnen, anschließend mit den gekoppelten (meistens mit Toleranzen) und den restlichen Abmessungen fortgesetzt werden. Für ein auf diese Weise vorbereitetes Mustermodell werden die Möglichkeiten des Grafikprogramms genutzt. Im fortgeschrittenen Grafikprogramm I-DEAS NX wird mit der Auswahl der „Catalog“ Schaltfläche begonnen (Abb. 10a) in der aus der Abmessungsmenge variable Abmessungen gewählt werden (Abb. 10b). Variable Abmessungen sind Abmessungen deren Werte, zusammen mit einer Änderung der Abmessungsparameter von Konstruktionsfamilien, variieren.

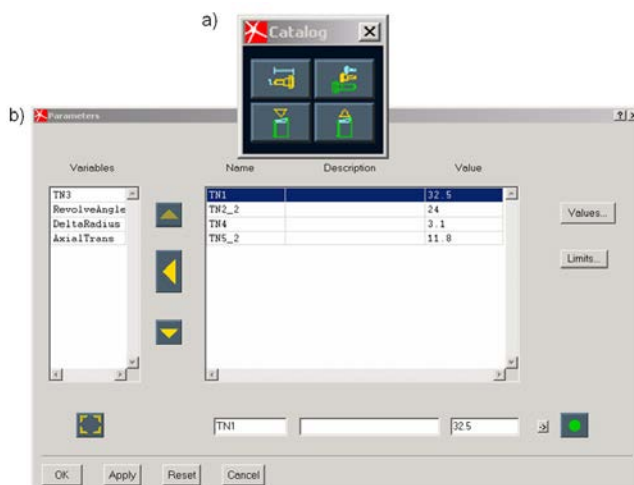


Abbildung 10: Auswahl von variablen Abmessungen

Denn im Editor, unter den Bedingungen der Konstruktionsähnlichkeit, gewählten Abmessungen werden Abmessungswerte für jede Typengröße zugeordnet. Jede Typengröße erhält eine eigene Identifikationsnummer (Abb. 11a). Ein auf diese Weise parametrisiertes 3D-Modell wird in das Verzeichnis der Typenreihe einer Konstruktionsfamilie übernommen (Abb. 11b).

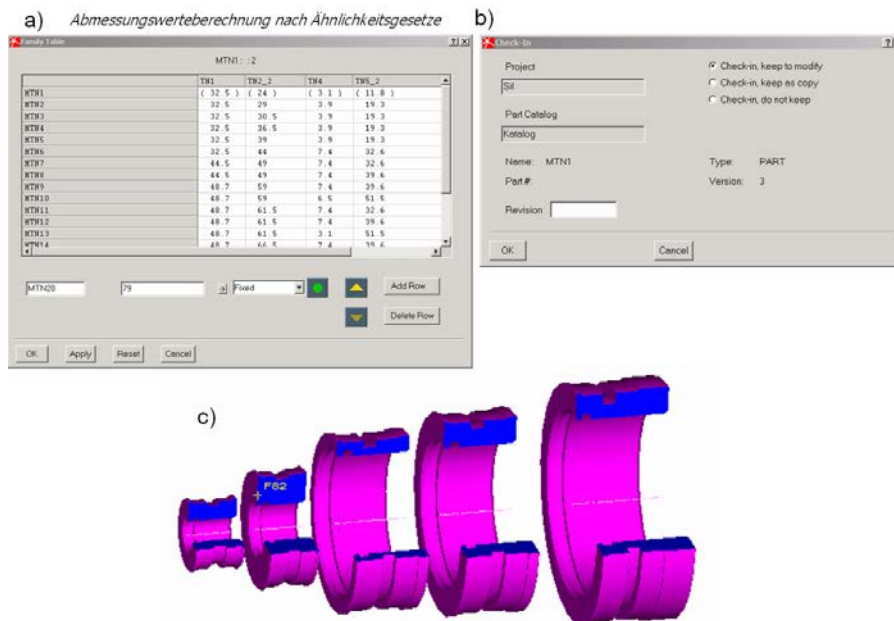


Abbildung 11: Grafische Parametrisierung im fortgeschrittenem grafischen Programm I-DEAS NX

Auf der Grundlage der grafischen Parametrisierung werden aus dem Verzeichnis einzelne Typengrößen von 3D-Elementen ausgewählt mit dem Ziel Baugruppen für künftige technische Mittel zu erstellen. Ein ähnlicher Parametrisierungsprozess wird im fortgeschrittenen grafischen Programm NX durchgeführt.

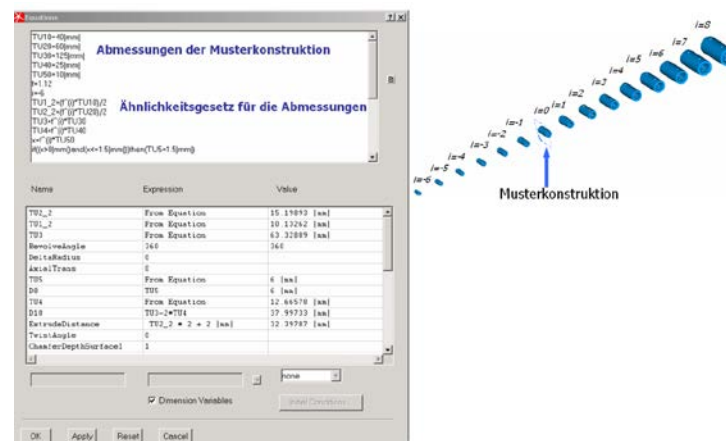


Abbildung 12: Aufzeichnung einer Typenreihe auf der Basis der grafischen Parametrisierung im NX Programm

Nach der Auswahl der variablen Abmessungen des Mustermodells im Programmmodul „Part Families“ (Abb. 12a) wird, entsprechend der Bedingungen der Konstruktionsähnlichkeit, die Auswahl zu den Abmessungswerten in einem Excel-Formular getroffen (Abb. 12b). Nach der Übernahme eines auf diese Weise parametrisierten Modells in das Verzeichnis (Abb. 12c), besteht die Möglichkeit der Verwendung dessen erzeugten Typengrößen.

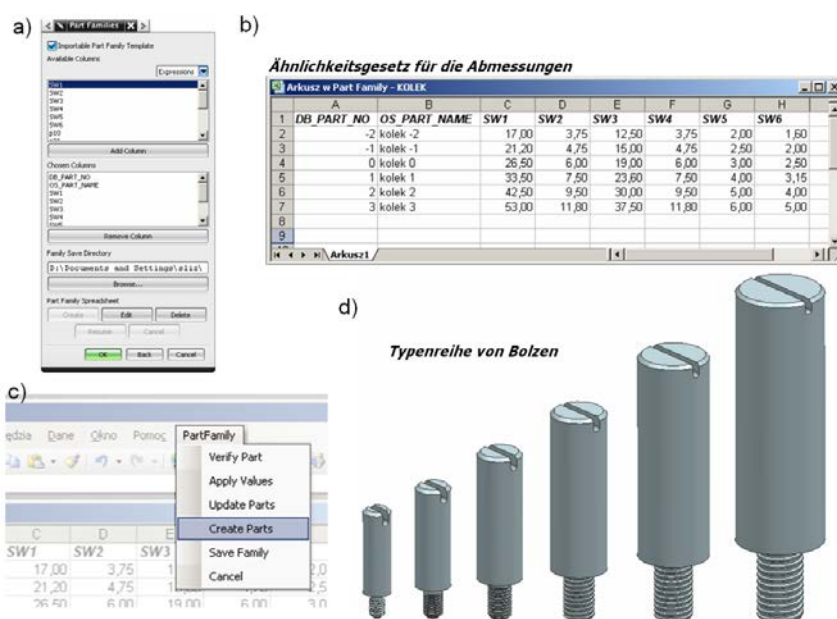


Abbildung 13: Aufzeichnung einer Typenreihe mittels relationaler Parametrisierung im I-DEAS NX

**Relationale Parametrisierung** verwendet einen internen Formeleditor des grafischen Programms. Im Editor werden die variablen Abmessungswerte der Musterkonstruktion bestimmt und danach in Abhängigkeit von der Ähnlichkeitszahl für die Abmessungen  $\phi_i$ , die Bedingungen der Konstruktionsähnlichkeit aufgezeichnet (Abb. 13a). Um ein bestimmtes 3D-Modell einer Typengröße im Editor zu bekommen wird ein bestimmter Wert der Variablen  $i$  zugeordnet (z. B.:  $i=-6, 8$ ). Wobei das Modell der Musterkonstruktion eine Bezeichnung  $i=0$  besitzt. Beispielhafte 3D-Modelle einer Hülse, erzeugt auf der Basis der relationalen Parametrisierung, sind in der Abbildung 13b dargestellt.

Die besten Parametrisierungseffekte wurden im Hinblick auf die Möglichkeit der Integration der Auswahl von Konstruktionsmerkmalen mit der Verwendung der programmierbaren Parametrisierung erzielt. Auf dieser Grundlage wurden in Rahmen von Projekten geordnete Konstruktionsfamilien von Nadelgreifern und pneumatischen Greifern gebildet.

## 6 Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass durch Ähnlichkeitsgesetze und Musterkonstruktion eine optimale Typenreihe gebildet werden konnte. Weiterhin bilden die gleichen, wie in der Musterkonstruktion vorhanden, physikalischen, stereomechanischen und einfachen Zustände die Grundlage für Ähnlichkeitsgesetze von Konstruktionsfamilien. Die Aufzeichnung derartig gebildeter Typenreihen ist mit programmierbarer, graphischer

und relationaler Parametrisierung möglich. Die Ähnlichkeitsgesetze wurden bereits experimentell, an entwickelten Typenreihen, verifiziert.

## Literatur

- [1] Gendarz, Piotr: Berechnung von Abmessungen für die Entwicklung von Baureihen. Konstruktion 10.98, S. 23-28
- [2] Gendarz, Piotr: *Methoden und Hauptzuordnungen im Prozess der Bildung von geordneten Konstruktionsfamilien*. 15 Symposium „Design for X“. The Design Society a worldwide community, Neukirchen 2004, s. 95 – 104
- [3] Gendarz, Piotr: *Hauptzuordnungen bei Modulbildungsprozessen von Konstruktionen*. Forschung im Ingenieurwesen – Engineering Research. Springer 73: 245-255
- [4] Gendarz, Piotr: *Kopplungsrelationen im Prozess der Bildung geordneter Konstruktionsfamilien*. Forschung im Ingenieurwesen – Engineering Research. Springer 74: 175-184
- [5] Gendarz, Piotr; Cielniak, Mateusz: *Quantitative constructional attributes selection in construction series of types*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, JAMME, vol. 49/1-2012, s. 62-70
- [6] Gerhard, E: *Baureihenentwicklung*. Kontakt & Studium Band 105, Expert Verlag, Grafenaut
- [7] Gerhard, Pahl; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Grundlagen*. Springer Berlin Heidelberg New York 2006

## Automatisierte Konfiguration auftragsspezifischer Stahlkonstruktionen

Thivakar Manoharan, Alexander Martha, Peter Köhler

Lehrstuhl für Rechneinsatz in der Konstruktion, Institut für Produkt Engineering

Universität Duisburg-Essen, Lotharstr.1, 47057 Duisburg

E-Mail: [thivakar.manoharan@uni-due.de](mailto:thivakar.manoharan@uni-due.de); Internet: <http://www.uni-due.de/cae>

**Inhalt:** Dieser Beitrag soll am Beispiel von Einhausungen für Abzugsförderer darstellen, wie auch Stahlkonstruktionen mit unterschiedlichen Ausprägungen automatisiert erzeugt werden können. Eine besondere Schwierigkeit stellt hierbei die je nach Größe, Belastungsart, Bestimmungsland aber auch durch die kundenindividuellen Bedürfnisse unterschiedlich ausgeführte Fachwerkkonstruktion dar. Dabei verändert sich nicht nur die Größe oder Form der einzelnen Stahlprofile, sondern auch die Anordnung und Verbindung dieser. All diese, weitere Anforderungen und die bereits vorliegenden Gestaltungsgrundsätze mussten bei der Entwicklung eines Configurators für Autodesk Inventor 2011 berücksichtigt werden, um eine vollautomatisierte Generierung der 3D-CAD-Baugruppenmodelle und anschließende teilautomatisierte Zeichnungsableitung nach Kundenwunsch zu erstellen. Letztendlich konnte so die Bearbeitungszeit zur Entwicklung der Einhausungen für Abzugsförderer deutlich reduziert werden.

**Abstract:** This article is intended to represent how steel structures with different forms can automatically be generated. This will be shown in the example of enclosures for discharge conveyor. A particular difficulty in this case represents the depending on size, load type, destination country but also by the individual customer needs, differently designed truss structure. Here, not only the size or shape of the individual steel profiles, but also the arrangement and connection of these changes. All these and other requirements and the previously developed design principles had to be considered in the development of a configurator for Autodesk Inventor 2011 to create a fully automated generation of 3D CAD assembly models and subsequent semi-automatic drawing creation to customer specification. Finally, the processing time to the development of enclosures for discharge conveyor can be significantly reduced.

**Stichwörter:** Konfiguration, Stahlfachwerkkonstruktionen, Einhausung, Abzugsförderer, Knowledge Based Engineering, Inventor, API

**Keywords:** configuration, steel structure, enclosures, discharge conveyor, Knowledge Based Engineering, Inventor, API



## 1 Einleitung

Die Verkürzung der Produktentwicklungszeit ist für Unternehmen, die kundenspezifische Produkte anbieten, ein wichtiger Punkt, um die Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen. Dabei geht es auch um die Absicherung einer frühzeitigen, detaillierten Angebotserstellung für den Kunden. Wünschenswert ist hier, dass schon bei der Angebotserstellung realitätsnahe Planungsmodelle geliefert werden können. Der Aufbau von geeigneten Mastermodellen hat hierfür in Verbindung mit Datenbank-Anbindungen und einem sinnvollen Einsatz eines regelbasierten Modellaufbau eine besondere Bedeutung. [1]

Der folgende Ansatz wurde am Beispiel von Einhausungen für Abzugsförderer (vgl. Abbildung 1) umgesetzt.



Abbildung 1: Beladung eines Abzugsförderers mit Einhausung durch einen LKW [2]

Eine Besonderheit an Einhausungen für Abzugsförderer ist, dass es bei zwei identischen Abzugsförderern, durch andere Randbedingungen zu unterschiedlich ausgeführten Einhausungen kommen kann. Durch die modulare Bauweise der Abzugsförderer sind diese leicht konfigurierbar und können nur in gestaffelten Breiten und Steigungen vorkommen. Die Einhausungen sind dann zum einen von der Geometrie des Abzugsförderers und zum anderen von kundenspezifischen Anforderungen wie Beladungsart, Absaughauben, Filteranlagen, Explosionsschutz, Treppengelände usw. abhängig. Zudem sind beim Engineering von Einhausungen die verschiedenen Belastungen wie Wind, Regen, Schneefall aber auch die Richtlinien des jeweiligen Bestimmungslandes zu berücksichtigen. Dafür sind im Rahmen eines Industrieprojektes anpassungsfähige (eingabegesteuer-



te) 3D-Master-Modelle für die Erstellung solcher Einhausungen für Abzugsförderer im CAD-System Inventor erzeugt worden, die dann zur Generierung der auftragsspezifischen Modelle dienen. In diesem Zusammenhang ist auch die Anbindung einer 3D-Profiltable, welche die gängigsten Profilarten und deren marktübliche Ausprägungen gemäß unterschiedlichster Designcodes abbilden kann, möglich. Mit den entwickelten Lösungen erfolgt eine teilautomatisierte Ableitung von normgerechten Zeichnungen und Stücklisten aus dem 3D-Modell, so dass mit geringem nachträglichen Anpassungen durch den Konstrukteur letztendlich die jeweils erforderlichen Fertigungsdokumente abgeleitet werden können.

## **2 Konstruktionsrandbedingungen**

Die Einhausung des Abzugsförderers besteht aus einem Stahlbaufachwerk, welches mit Trapezblechen verkleidet wird. Das Stahlbaufachwerk wird in der Regel aus Winkel- bzw. U-Profile und Blechen konstruiert und hergestellt. Es sind geschweißte Rahmen, die auf der Baustelle zusammengeschaubt und dann verkleidet werden. Bei besonderen Anforderungen kann zur Vermeidung von Staubbildung die Einhausung von innen mit Stoff oder auch Trapezblechen verkleidet werden. Die Trapezblechverkleidung von außen und die Innenverkleidung wurden in diesem Schritt der Automatisierung zunächst nicht implementiert. Die allgemeinen Regeln zur Trapezblechverkleidung sind in einer Norm festgehalten [3].

### **2.1 Stahlfachwerkkonstruktion**

Die Stahlfachwerkkonstruktion wird mit Winkelprofilen und gekanteten Blechen ausgeführt. Der Konstrukteur muss je nach max. Windgeschwindigkeit, max. Erdbebeneinwirkungen und der Breite des Aufnahmebereichs die benötigte Profilvariante auswählen. Je nach Auftragsland werden ähnliche Profile aus der Norm des jeweiligen Landes ausgewählt. Nach der Erstellung des Stahlfachwerks für die Einhausungen werden diese mit Hilfe eines Statik-Programms überprüft.

Die statischen Berechnungen für Einhausungen sind nach dem „EUROCODE 0: Grundlagen der Tragwerksplanung“ [4] und „EUROCODE 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten“ [5] nachzuweisen. Die Lastannahmen für Eigengewicht und Nutzlasten sollten nach dem „EUROCODE 1: Einwirkungen auf Tragwerke“ [6] berücksichtigt werden.

Weiter Lasteinwirkungen wie z. B. für Wind, Schnee, Staub, Verkehrslasten und Erdbeben sind unter anderem nach EUROCODE 1 [7] [8] zu berücksichtigen. Da diese Angaben nur für die europäischen Länder gelten, wurden im Rahmen dieses Projektes eigene Werte zugrunde gelegt, die für den weltweiten Einsatz genutzt werden können. Alle zur Konstruktion von Einhausungen relevanten Informationen sind als Regeln in einem Dokument zusammengefasst worden. Ist die Konstruktion einer Einhausung nicht nach diesem Dokument durchführbar, so ist eine individuelle statische Berechnung erforderlich.

## **2.2 Zeichnungen und Stücklisten**

Wie es im Stahlbau oftmals üblich ist, sind die Einzelteile einer Baugruppe auf der Baugruppenzeichnung platziert. Der Zeichnungssatz für den Stahlbau einer Einhausung besteht in der Regel aus mehreren Zeichenblättern. Die Einhausung erhält als Produkt eine Artikel- und Zeichnungsnummer, welche beim Klassifizieren vergeben wird. Jedes Zeichnungsblatt erhält die gleiche Zeichnungsnummer und die einzelnen Blätter des Dokumentensatzes erhalten eine Blattnummer und Anzahl. Das erste Zeichnungsblatt enthält die Übersicht des Stahlbaufachwerks mit einer Seitenansicht, einer Draufsicht und mehreren Zeichnungsschnitten. An diesen Zeichnungsansichten werden die wichtigsten Eckabmessungen angegeben.

Auf den nachfolgenden Zeichnungsblättern werden die Schweißrahmen mit den Einzelteilen und die Querverbände dargestellt. Dazu werden die Schweißrahmen in eine oder mehreren Ansichten platziert und direkt neben der Hauptansicht die dazu passenden Einzelteile. Schweißzeichen bzw. Schweißanweisungen werden mit typischen Details dargestellt. Die Positionsnummern für die Einzelteile werden über alle Ansichten vergeben. Profile und Bleche, welche über keine Gehrungsschnitte, Bohrungen oder bearbeitete Oberflächen verfügen, werden oft nicht als Einzelteil platziert und bemaßt. Ein gutes Beispiel sind hierfür die Diagonalverbände, welche in den Rahmen eingeschweißt werden. Diese erhalten ausschließlich eine Stücklistenposition und werden in der Hauptansicht positioniert.

### 3 Konfiguration von Einhausungen

Aufgrund der in Kapitel 2 beschriebenen Konstruktionsrandbedingungen, der Gestaltungsvorgaben und den gegebenen Softwaretools wurde ein Ablaufdiagramm zur Konfiguration von Einhausungen (siehe Abbildung 2) erstellt.

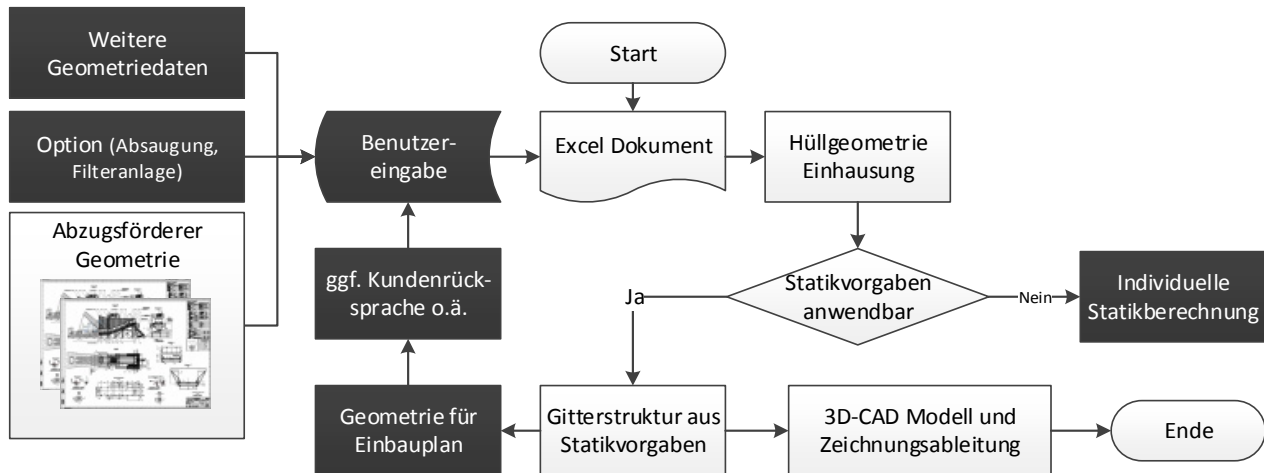


Abbildung 2: Ablauf einer Konfiguration

#### 3.1 Übergabeparameter

Die für die Konfiguration relevanten Daten sollen in einem Excel Dokument zusammengefasst werden. So können auch Benutzer ohne CAD-Kenntnisse, wie z. B. Vertriebsmensen, beim Kunden direkt die Daten für die Konfiguration vorbereiten und dem Konstrukteur übergeben. Zusätzlich kann so, zu jeder Konfiguration, die Konfigurationsdaten als Excel- oder PDF-Dokument abgelegt werden. Eingabeparameter in das Excel Dokument sind neben den Projektdaten (Auftragsnummer, Kundennummer, Bearbeiter, ...) die Konfigurationsdaten. Dazu gehören Daten zur Beschreibung der Kontur des Abzugsförderers, weitere Geometriepunkte aber auch die zusätzlichen Optionen, die letztendlich festlegen, ob ein Flansch für eine Absauganlage oder sogar eine komplette Filteranlage eingebaut werden soll. Auch die Option zum Explosionsschutz und eine flache Abdeckung des Förderers im hinteren Bereich bei besonders langen Förderern kann hier ausgewählt werden. Dieses Excel Dokument kann dann zur Konfiguration in die grafische Benutzeroberfläche des Konfigurators eingeladen werden.

Die KBE-Applikation steht beim Aufbau des 3D-CAD-Modells im Mittelpunkt der Konfiguration. Alle für die Konfiguration der Einhausung relevanten CAD-Funktionen werden

von der Applikation aus durchgeführt. Die KBE-Anwendung kann unabhängig vom CAD-System gestartet werden, muss lediglich vor Beginn der Konfiguration eine Verbindung zum CAD-System herstellen. Nach jedem Start liest die Applikation die Daten für die Einstellungen aus den extern ausgelagerten Dateien aus und übernimmt diese. Das Anpassen dieser Daten oder Einpflegen neuer Daten kann zu jedem Zeitpunkt geschehen. Bevor der Benutzer die Möglichkeit hat die Einhausung aufzubauen, müssen zuvor die Übergabeparameter importiert werden. Die KBE-Applikation soll diese Werte nachdem Lesen, dem Anwender zur Ansicht darstellen.

### 3.2 Grobgestaltung

Anschließend kann die Einhausung konfiguriert werden. Hierzu wird zunächst eine Hüllgeometrie nach den eingelesenen Daten und eingestellten Optionen automatisiert erzeugt. Diese Hüllgeometrie stellt den Bereich, der später platzierten Profile dar (vgl. Abbildung 3).

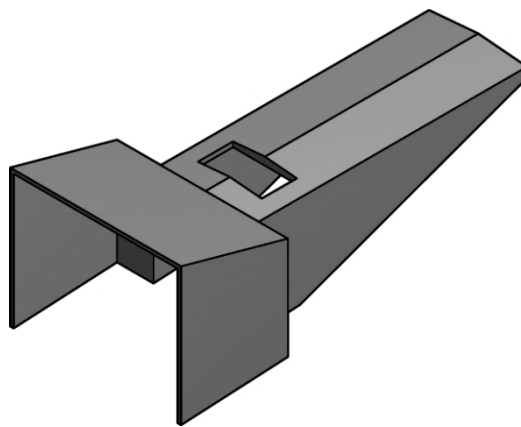


Abbildung 3: Hüllgeometrie

Der Konstrukteur hat nun die Möglichkeit die grobe Geometrie der Einhausung zu manipulieren, ohne dass die Regeln aus dem Stahlbau bei jeder Anpassung überprüft werden müssen. Auch müssen nicht bei großen Anpassungen jedes Mal Elemente ein- und ausgebaut werden. Wenn die gewünschte Geometrie erreicht wurde, muss der Benutzer die Hüllgeometrie freigeben. Nach dem die Grobgeometrie feststeht, kann durch teilen dieser Hüllgeometrie in einzelne Bereiche und ebene Teilsysteme die Gitterstruktur erzeugt werden. Auf jede Außenfläche jedes Bereiches wird automatisiert eine 3D-Skizze platziert, die den Aufbau der Rahmenelemente aufzeigt. (Abbildung 4). Diese stellt genau

die Position und Ausrichtung der Profile dar. Erst in diesen Schritt werden die abgeleiteten Regeln aus der Statik Berechnung angewendet.

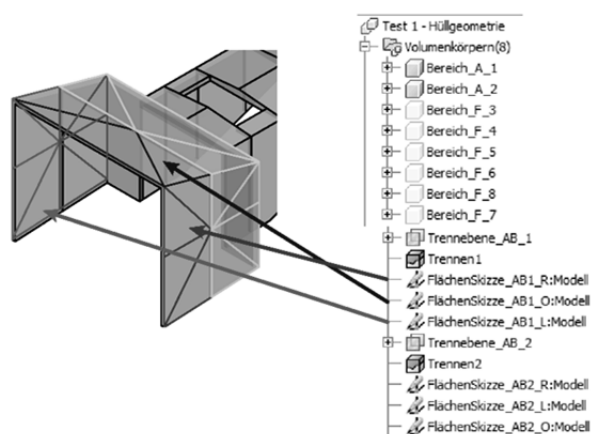


Abbildung 4: 3D-Skizzen zur Platzierung der Profile

Falls in bestimmten Bereichen die vorgegebenen Regeln nicht anwendbar sind, wird der Konstrukteur aufgefordert, eine individuelle Statik Berechnung zu veranlassen. Aber auch hier lässt sich die bereits erstellte Gitterstruktur in Stabwerksberechnungsprogrammen exportieren, sodass ein manueller Neuaufbau der Geometrie im Stabwerksberechnungsprogramm nicht notwendig ist.

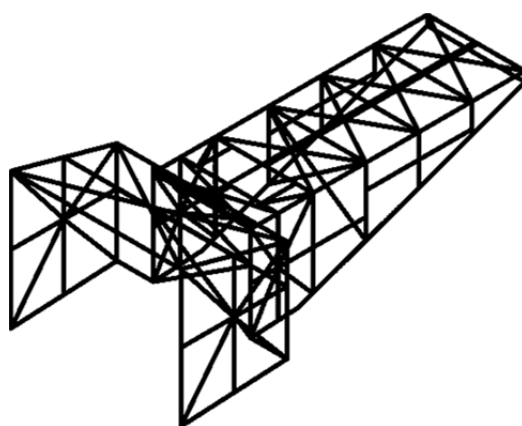


Abbildung 5: Gitterstruktur

Nach der Erstellung und Freigabe der Gitterstruktur kann dieses Modell an den Kunden gegeben werden, sodass der dieses für seinen Einbauplan nutzt (Abbildung 5). Das Modell wird hierzu automatisch in je ein natives und neutrales 2D- und 3D-CAD Datei abgespeichert.

### 3.3 Detailgestaltung

Mit Festlegung der Gitterstruktur kann die Konfiguration mit dem Aufbau des kompletten 3D-Modells weitergeführt werden (vgl. Abbildung 6).

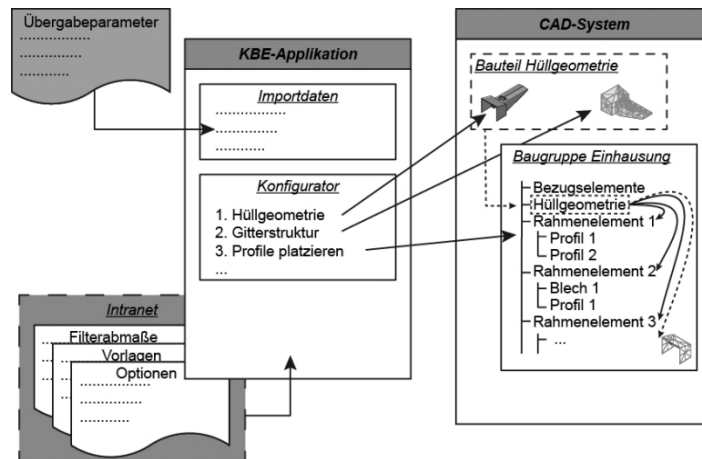


Abbildung 6: Konzept des Konfigurators

Hierzu wird die Gitterstruktur in die oberste Baugruppenstruktur eingebaut und analysiert. Abhängig von der Namensgebung der einzelnen Bereiche, wählt das KBE-System das passende 3D-Mastermodell aus dem Intranet und passt diese durch Übergabe geeigneter Parameter und der Gitterstruktur an das 3D-Mastermodell an (Abbildung 7). Hierbei werden auch abhängig vom Bestimmungsland automatisch die länderspezifischen Profile eingebaut. Anschließend wird das angepasste Modell in die Baugruppe Einhausung eingebaut.

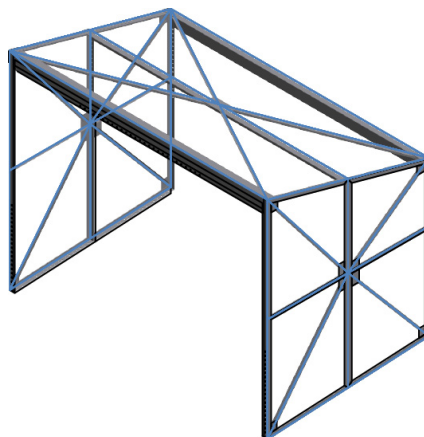


Abbildung 7: Platzierung der Profile auf Gitterstruktur

### 3.4 Zeichnungsableitung

Die Zeichnungsableitung der einzelnen Bereiche ist mit den Mastermodellen bzw. Modellschablonen verknüpft, sodass sich nach einer automatisiert durchgeführten „Bereinigung“ des Bemaßungs- und Darstellungsschemas und der Nomenklatur, projektbezogene Modell- und Zeichnungsdateien ergeben, die bei Bedarf weiter angepasst werden können. Auch die Anpassung der Zeichnungsvorlagen in den Mastermodellen kann jederzeit durchgeführt werden.

In einigen Bereichen wurden die Zeichnungsblätter neu strukturiert bzw. geteilt, sodass die Nachbearbeitung möglichst überflüssig wird. Bei Bedarf ist diese Strukturierung manuell bei den jeweiligen Projektdaten durchzuführen. Die Zeichnungsblätter jeder Modellschablone werden abschließend in die Hauptbaugruppe der Konfiguration in einzelne Blätter zusammengefasst.

So werden nach und nach die einzelnen Unterbaugruppen instanziiert, angepasst und eingebaut. Falls zu einem Bereich kein passendes Mastermodell vorhanden ist, wird ein allgemeines Modell eingebaut und der Konstrukteur kann dieses manuell anpassen. Somit können auch nicht vorgedachte neuartige oder ausgefallene Einhausungsgeometrien erzeugt werden.

## 4 Zusammenfassung

Die KBE-Applikation zur Erzeugung von Einhausungen konnte erfolgreich umgesetzt werden, so dass die Bearbeitungszeit hierfür um ca. 90 % reduziert werden kann.

Die Geometrie der Einhausung wird zunächst als Hüllgeometrie dargestellt. Diese kann vom Konstrukteur innerhalb der Applikation manipuliert und angepasst werden. Unabhängig davon kann sie bereits für die Einbauplanung genutzt werden. Zur Erstellung der Gitterstruktur wird in der Applikation die Hüllgeometrie in einzelne Bereiche aufgeteilt und regelkonform mit Linien versehen, die dann später zum automatisierten Aufbau der Rahmenelemente und schließlich der Stahlfachwerkkonstruktion der Einhausung dienen.

Wegen der Kombination von Forderungen nach einer vollständig automatisierten Zeichnungsableitung und nach einer fortlaufenden baugruppenübergreifenden Positionsnummerierung musste ein Konzept entwickelt werden, das automatisierte Zeichnungsableitungen von Komponenten nicht nur auf Komponentenebene, sondern auch in übergeordneten Baugruppenmodellen erlaubt. Hierfür wurden Vorlagen für Masterbaugruppen

und Zeichnungsschablonen erarbeitet. Wären diese Anforderungen nicht in Kombination vorhanden, hätten sich einige Vereinfachungen ergeben. Auch die automatisierte Einbindung zusätzlicher Komponenten wäre einfacher.

## Literatur

- [1] Danjou, Stéphane; Lupa, Norman; Köhler, Peter: *Approach for Automated Product Modeling Using Knowledge-Based Design Features*. In: Computer-Aided Design & Applications Jg. 5 (2008) ; Nr. 5 , S. S. 622 - 629
- [2] N. N.: *SAMSON Materials Handling – Industries – Minerals – Mining and Minerals*. [http://www.bwmech.co.uk/en/bw/industries/minerals\\_mining\\_quarrying/coal\\_and\\_petcoke](http://www.bwmech.co.uk/en/bw/industries/minerals_mining_quarrying/coal_and_petcoke), 13.03.2013.
- [3] DIN EN 1993-1-3:2010-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-3: Allgemeine Regeln - Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche*; Deutsche Fassung EN 1993-1-3:2006 + AC:2009
- [4] DIN EN 1990:2010-12, *Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung*; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010
- [5] DIN EN 1993-1-1:2010-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009
- [6] DIN EN 1991-1-1:2010-12, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau*; Deutsche Fassung EN 1991-1-1:2002 + AC:2009
- [7] DIN EN 1991-1-4:2010-12, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten*; Deutsche Fassung EN 1991-1-4:2005 + A1:2010 + AC:2010
- [8] DIN EN 1991-1-3:2010-12, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten*; Deutsche Fassung EN 1991-1-3:2003 + AC:2009



## Systematische Identifikation einer anforderungsoptimalen Sandwichkonfiguration mit Hilfe einer Multikriterien-optimierung (MKO)

L. G. Ngahane Nana , T. Fieder, S. Dallmeier, B. Günther, J. Feldhusen

Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus (ikt) für RWTH Aachen  
Steinbachstraße 54B, 52074 Aachen  
E-Mail: nana@ikt.rwth-aachen.de; Internet: www.ikt.rwth-aachen.de

**Inhalt:** Dem Leichtbau kommt heutzutage eine immer größere Bedeutung zu. Eine Möglichkeit eine Leichtbaulösung zu erzielen ist der konstruktive Leichtbau, bei dem eine möglichst gleichmäßige Werkstoffausnutzung angestrebt wird. Ein Beispiel dafür ist die Sandwichstruktur. Einer der Vorteile bei Sandwichbauteilen ist ihre nahezu unendlichen Kombinationsmöglichkeiten hinsichtlich Materialien und geometrischen Abmessungen. Allerdings liegt hier auch einer der Hauptnachteile, denn es fehlen einfach anzuwendende Gestaltungsrichtlinien, die es dem Konstrukteur ermöglichen, die optimale Konfiguration aus dieser riesigen Anzahl möglicher Lösungen auszuwählen. Deswegen werden Sandwichs im Maschinenbau nur eingeschränkt eingesetzt. Hier greift die Arbeit der Forschungsgruppe Multimaterial-Strukturen am Institut für allgemeine Konstruktionstechnik (ikt) an. Eins der Ziele der Gruppe ist die Entwicklung einer Methodik, mit der eine optimale Material- und Geometriekombination für mehrere, zuvor definierte Kriterien identifiziert werden kann. Da diese Kriterien je nach Einsatzzweck stark variieren können, ist eins der wesentlichen Merkmale der Methode ihre Flexibilität.

**Abstract:** The lightweight design has nowadays an increasingly important role. One way to achieve a lightweight solution is the lightweight design, where utilization of material is mostly uniform for the complete structure. One example for this lightweight approach is the sandwich structure. The major advantage of sandwich panels is their almost infinite combination possibilities with regard to materials and geometric dimensions. However, here is one of the main disadvantages too, the lack of applicable design guidelines that enable the designer to select the optimal configuration of this vast number of possible solutions. That is the reason why sandwich structures are not common used in the field of mechanical engineering. This issue is addressed by the research group multi-material structures of the institute for engineering design at the RWTH Aachen University. One goal of the group is to develop a methodology by which an optimal material and geometry combination for multiple, previously defined criteria can be identified. As these criteria can widely vary, depending on the application, one of the essential features of the method is its flexibility.

**Stichwörter:** Sandwich-Bauweise, Optimum, Multi-Kriterien-Optimierung, Methodik, Pareto-Set

**Keywords:** Sandwich structure, Optimum, Multi-Objective Optimization, methodology, Pareto-set

## 1 Einleitung

Wie in [1] geschrieben wurde, geht es bei der Konstruktion, bei der Entwicklung und bei jeder Handlung immer darum, das Beste herauszuholen. Doch was ist das Beste und wie kann man es finden? Woher weiß man, dass eine Lösung die Beste ist?

Das Ziel einer Produktentwicklung ist es, sichere Produkte zu erstellen, die ihre Funktion zuverlässig erfüllen und das zu akzeptablen Kosten. Laut [2] wird der gesamte Maschinen- und Fahrzeugbau in den letzten Jahren durch eine umfassende Innovations- und Wirtschaftlichkeitsdiskussion beherrscht. Zielvorgabe ist es, möglichst einzigartige Produkt- und Systemlösungen innerhalb kurzer Entwicklungszeiten, mit einer hohen Ausführungsqualität und zu niedrigen Kosten zu entwickeln. Hierbei hat sich ein deutlicher Trend zum Leichtbau herauskristallisiert, der die verlangte Symbiose einer wirtschaftlichen Gesamtlösung durch optimalen Werkstoffeinsatz und angepasste Bauweisen, bei bestmöglicher Ressourcenschonung verfolgt. Leichtbau als Selbstzweck ist aber im Regelfall keine ausreichende Zielsetzung und darum in der Praxis stets mit funktionalen Anforderungen verbunden. Oftmals führen jedoch erst Kompromisse der oft widersprüchlichen Anforderungen zu einem wirtschaftlichen Einsatz. Im strukturellen Leichtbau werden oft eine hohe Steifigkeit und gleichzeitig eine kompakte Form gefordert. In derartigen Anwendungsfällen kommen bevorzugt Sandwichaufbauten zur Anwendung. Diese bestehen in ihrem einfachsten Aufbau aus zwei dünnen, steifen Deckschichten und einem sehr leichten aber dafür dickem Kern. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Multikriterienoptimierung für ein Sandwichbauteil hinsichtlich drei unterschiedlicher Anforderungen durchgeführt, um das Potential dieser Methode aufzuzeigen.

## 2 Stand der Technik

Nach [3] haben sich im Laufe der Zeit zahlreiche Methoden und Richtlinien zur Sandwichkonstruktion und deren Optimierung etabliert. Allerdings berücksichtigen die bisher existierenden Ansätze nur die Optimierung hinsichtlich eines einzelnen Kriteriums. Optimierungsziels. So kann beispielsweise die ideal steife oder leichte Sandwichkonfiguration relativ leicht identifiziert werden. Soll allerdings eine ideal steife, gleichzeitig leichte und kostengünstige Konfiguration gefunden werden, fehlt es an einfach anzuwendenden Ansätzen für eine Optimierung hinsichtlich mehrerer Kriterien, einer sogenannten multikriteri-

ellen Optimierung (MKO). Finden sich für die Optimierung hinsichtlich zwei oder maximal drei Kriterien noch grafische Methoden mit dreidimensionalen Lösungsräumen, wie sie bei den Arbeiten von Pflug und Verpoest [4] und von Ashby [5] zu finden sind, stoßen diese bei spätestens vier Kriterien an die Grenzen des darstellbaren. Außerdem muss für jede mögliche Kombination von Kriterien ein einzelnes Diagramm vorliegen, was die Suche nach dem Optimum nicht gerade vereinfacht.

Aus den genannten Gründen kommt für die MKO nur ein numerischer Ansatz in Frage, mit dem das Optimierungsproblem mathematisch beschrieben werden kann. Damit kann die Optimierung flexibel an die jeweilige Aufgabe angepasst werden, da die Anzahl an Kriterien unendlich ist, die Materialkombinationen, die geometrischen Abmessungen und deren Ausprägungen vom Nutzer selber definiert werden können.

In der Literatur findet sich eine große Anzahl an numerischen MKO. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein genetischer Algorithmus, wie er in [6] beschrieben wird, ausgewählt. Der genetische Algorithmus ist eine Optimierungstechnik, die von der natürlichen Selektion und Genetik natürlicher Lebewesen inspiriert ist. Die Initialisierung beginnt mit einer zufällig generierten ersten Generation von Lösungen. Im zweiten Schritt erfolgt die so genannte Evaluation, bei der jeder Lösung entsprechend ihrer Güte ein Wert der Fitnessfunktion zugeordnet wird, mit der ein Vergleich zwischen den einzelnen Lösungen möglich ist. Im nächsten Schritt erfolgt die eigentliche Optimierung bei der zunächst durch Selektion geeignete Lösungen für das weitere Verfahren ausgewählt werden. Diese werden in der folgenden Rekombination kombiniert und anschließend einer Mutation unterzogen. Diese zweite Generation wird wieder in einer Evaluationsphase bewertet, und in der folgenden Selektionsphase werden wieder die besten Lösungen ausgewählt und der Prozess beginnt wieder von vorne. So werden immer neue Generationen von Lösungen erzeugt bis eine geeignete Lösung gefunden ist, die ein vorher definiertes Abbruchkriterium erfüllt. Vorteile des genetischen Algorithmus sind, dass dieser sowohl auf diskreten als auch auf kontinuierlichen Variablen angewendet werden kann, keine Ableitung der Zielfunktionen benötigt wird, und damit es möglich ist, eine hohe Anzahl von Variablen zu bearbeiten.

Bevor jedoch auf die eigentliche Optimierung eingegangen wird, werden zunächst noch kurz zum Verständnis notwendige Begriffe erläutert.

### 3 Sandwichstrukturen

Eine Sandwichplatte besteht in ihrem einfachsten Aufbau aus zwei Deckschichten und einem Kern. Das Ziel ist es, eine Struktur mit einer hohen Biegesteifigkeit und Festigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht zu erzeugen. Die Trennung der Deckschichten durch den Kern erhöht das Flächenträgheitsmoment des Querschnitts und dessen Widerstandsmoment, wodurch eine Struktur produziert wird, die Biege- und Knicklasten gut widersteht. Der strukturelle Aufbau entspricht also einem Doppel-T-Träger. Sandwichstrukturen werden häufig dort eingesetzt, wo eine Gewichtseinsparung essentiell ist, wie beispielsweise im Verkehrswesen. Auch in der Natur finden sich zahlreiche Beispiele für Sandwichlösungen, sei es im Blattaufbau von Pflanzen oder den menschlichen Knochen. [3] [7]

### 4 Optimierung

Die Optimierung sollte zweckmäßig während der Vorentwurfsphase durchgeführt werden. Diese Phase ist ideal, um Kosten zu bewerten, Alternativen miteinander zu vergleichen und die am besten geeignete Alternative für die Zielsetzung zu finden [1].

#### 4.1 Optimierungsmethodik

Die Design Methodik, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird ist laut [8] in vier Phasen geteilt:

1. Erstellung einer Anforderungsliste: Diese Liste ist das Eingangselement des Optimierungsprozesses. Die Qualität der erhaltenen Lösung hängt von ihrer Genauigkeit und Konsistenz ab. Die Anforderungsliste muss die zu erreichenden Ziele festlegen und die damit verbundenen Restriktionen. Dazu müssen auch die zu verwendenden Werkstoffe und die Einsatzumgebung definiert werden.

2. Aufstellung der mathematischen Gleichungen bzw. mathematische Umsetzung des Problems: Sobald die Spezifikationen schon erstellt sind, ist der nächste Schritt das physikalische Problem in ein äquivalentes mathematisches Problem umzusetzen, mit dem Ziel Zielfunktionen und Restriktionen zu bewerten. Diese Phase ist die empfindlichste und wichtigste Phase des Designoptimierungsprozesses. Hier werden Gleichungen manipuliert, um die mathematische Modelle zu bilden, die die Funktionsfähigkeit oder das Verhal-

ten der unterschiedlichen Systemelemente und die zu optimierenden Kriterien beschreiben.

3. Auflösung des Optimierungsproblems: Diese Phase besteht in der eigentlichen Lösung des Designproblems mit der Hilfe einer Optimierungsmethode. In der Literatur gibt es mehrere Arbeiten, die gezeigt haben, dass es keine universelle Methode gibt, die für alle Optimierungsprobleme universell einsetzbar ist. Die Methode muss daher abhängig von den Merkmalen (mit oder ohne Restriktionen, mit kontinuierlichen oder diskreten Variablen, etc.) des zu lösenden Optimierungsproblems ausgewählt werden.

4. Lösungsanalyse: Diese Phase dient dazu, die ermittelten Lösungen hinsichtlich ihrer Anforderungserfüllung zu bewerten und gegeben falls ungeeignete Lösungen zu verwerfen. Sollte keine Lösung gefunden werden, ist es notwendig zu den vorherigen Schritten zurückzukehren und, falls nötig, die Neubearbeitung des Wissens und der eingesetzten Methoden durchzuführen.

Wie oben bereits beschrieben, kommt für eine anforderungsoptimale Sandwichstruktur als Methode nur eine multikriterielle Optimierung in Frage, weshalb dies im Folgenden näher erläutert wird.

## **4.2 Multikriterielle Optimierung**

Die multikriterielle Optimierung wurde zunächst primär im wirtschaftlichen Bereich eingesetzt und hielt dann nach und nach auch Einzug in den ingenieurwissenschaftlichen Bereich. Im Gegensatz zu allgemein bekannten Optimierungsproblemen, wo eine Lösung nur hinsichtlich eines Kriteriums optimiert wird, erfolgt bei der MKO die Suchen nach mehreren optimalen Lösungen und nicht nach dem einem Optimum.

Das Ziel einer MKO ist es, mehrere Zielfunktionen zu maximieren oder zu minimieren, oder aber die Werte dieser Zielfunktionen in einem bestimmten Bereich konstant zu halten. Die MKO wird durch eine Gruppe von Alternativen, mindestens zwei Zielfunktionen, Nebenbedingungen und einer Optimierungsmethode definiert.

Unter Alternativen versteht man die möglichen Kombinationen von Variablen, für die die Lösungen für das Problem gefunden werden können. Variable sind Parameter, die von dem Konstrukteur geändert werden können, oder durch eine Optimierungsmethode ausgewählt werden. Die Identifizierung bzw. die Erstellung des Variablenraums ist eine grundlegende Aufgabe bei der Definition des Problems. Dieser Raum kann begrenzt festgelegt

werden, oder durch eine Reihe von Bedingungen definiert werden, die durch die Alternativen geprüft werden müssen.

Zielfunktionen können nicht direkt geändert werden; sie werden von den Variablen gesteuert. Daher muss einen mathematischen Zusammenhang zwischen den Variablen und den Zielfunktionen bestehen.

Die Nebenbedingungen gibt den Voraussetzungen, die von der Variablen bzw. der Zielfunktionen erfüllen werden müssen. Diese Nebenbedingungen sind oft Ungleichheitsbedingungen und Gleichungen, die den Lösungsraum einschränken.

Das Verfahren mit denen die Variablen ausgewählt werden, um die besten Alternativen zu finden, sind von der Optimierungsmethode abhängig.

Bei mehr als einem Optimierungskriterium, muss der optimale Kompromiss zwischen den unterschiedlichen, teils widersprüchlichen Kriterien gefunden werden. Das Ergebnis einer MKO ist eine Reihe von Lösungen, die nicht-dominierte Lösungen genannt wird. Häufig findet sich auch der Begriff „Pareto-Menge“ genannt [9].

Die Ermittlung der Pareto-Menge ist allerdings nur der erste Schritt in einem MKO-Prozess. Der zweite Schritt ist die Wahl des Optimums aus den nicht-dominierten Lösungen entsprechend den Präferenzen des Entscheiders. Allerdings sollte darauf hingewiesen werden, dass die Wahl einer Endlösung für ein genaues Problem Expertenwissen des Problems bedarf. Das Umfeld des Problems ist auch wichtig; denn die Lösung für ein Problem in dem Bereich der Luftfahrt wird nicht die gleiche Lösung im Bereich der Automobilindustrie werden.

Die unterschiedlichen Kriterien für eine MKO können auch aus vielen verschiedenen Gebieten stammen, daher muss der Ingenieur, der eine MKO durchführen will, sich vorher intensiv mit dem Problem auseinandersetzen und in seiner Gesamtheit verstehen.

## **5 Fallbeispiel**

### **5.1 Sandwichplatte**

Um die gewählte Methode zu testen, wurde eine Sandwichplatte, wie in Abbildung 2 zu sehen ist, ausgewählt. Es handelt sich um ein Sandwich mit einer Länge von 1440 mm, einer Breite von 200 mm und einer Gesamtdicke von 60 mm. Für dieses Beispiel werden die Randbedingungen getroffen, dass beide Deckschichten aus das gleiche Material bestehen und beide die gleiche Dicke besitzen.

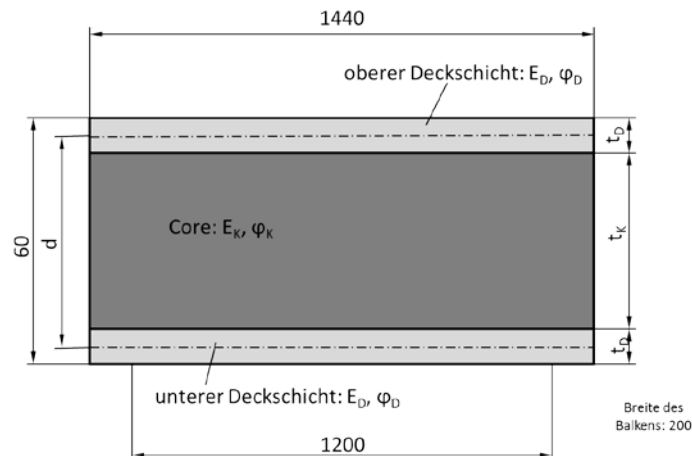


Abbildung 1: Konfiguration der verwendeten Sandwichplatte

## 5.2 Definition des Optimierungsproblems

Das in Abbildung 1 dargestellte Problem enthält drei unabhängige Hauptvariablen: Das Material für die Deckschichten, das Material für den Kern und die Dicke der Deckschichten. Die Dicke des Kerns ergibt sich aus der Gesamtdicke des Sandwichs abzüglich beider Deckschichtdicken, weshalb diese nicht als Parameter definiert ist. Diese drei sind die Parameter, die in diesem Fall entscheidend für eine optimale Parameterkombination sind. Für den Kern stehen drei und für die Deckschicht zwei unterschiedlichen Materialien mit jeweils drei unterschiedlichen Dicken zur Auswahl. Die geringe Anzahl an Variablen wurde bewusst so gewählt, um die ermittelten Lösungen mit „manuellen“ Berechnungen überprüfen zu können.

Im Rahmen dieser Fallstudie gibt es drei ausgewählte Zielfunktionen: die Biegesteifigkeit  $D$ , die zu maximieren ist; die Gesamtmasse  $M_{\text{Ges}}$  und die Gesamtkosten  $K_{\text{Ges}}$  des Balkens, die beide zu minimieren sind. Die oben genannten Zielfunktionen werden in die nächste Gleichung (1) bis (3) in Abhängigkeit der Designparameter ausgedrückt.

$$D = \frac{E_D b t_D^3}{6} + \frac{E_D b t_D d^2}{2} + \frac{E_K b t_K^3}{12} \quad (1)$$

$$M_{\text{Ges}} = L b (2 \varphi_D t_D + \varphi_K t_K) \quad (2)$$

$$K_{\text{Ges}} = L b (2 K_D \varphi_D t_D + K_K \varphi_K t_K) \quad (3)$$

Mit

$E$  = E-Modul

$d$  = Abstand zwischen den Mittellinien der Deckschichten

$b$  = Breite

$L$  = Länge

$K$  = Kosten pro Kg/ Material

$t$  = Dicke

$\varphi$  = Materialdichte

$D$  und  $C$  = Indizes für Deck und Kern

Die unmittelbaren Restriktionen für das Problem sind folgende:

- Länge des Sandwichbalkens:  $L = 1440$  mm
- Breite des Sandwichbalkens:  $b = 200$  mm
- Gesamte Dicke  $t = 60$  mm
- Dicke der Deckschicht  $t_D = [0.5; 1; 2]$  mm
- Materialmöglichkeiten für die Deckschicht: St37 und St 52
- Materialmöglichkeit für den Kern: R31, R51 und R71

### 5.3 Ablauf des Algorithmus

Der Algorithmus besteht im Rahmen dieser Untersuchung nur aus zwei Schritten, der Initialisierung und der Evaluation. Im ersten Schritt werden Daten für alle Variablen erstellt. Danach wird die erste Generation der Lösungen mittels der oben aufgeführten Formeln erzeugt. Da es nur 18 möglichen Kombinationen gibt, enthält die erste Generation alle möglichen Kombinationen. Eine Übersicht über die 18 Kombinationen findet sich in Tabelle 1. Im zweiten Teil wurden die Zielfunktionen mit dem Ziel evaluiert, die Pareto-Menge zu erzeugen.

Tabelle 1: Übersicht der Deckschichtkombination (oben) und der möglichen Kombinationen(unten)

|       | 0,5                | 1                  | 2                  |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| St 37 | Deck <sub>11</sub> | Deck <sub>12</sub> | Deck <sub>13</sub> |
| St 52 | Deck <sub>21</sub> | Deck <sub>22</sub> | Deck <sub>23</sub> |

|                    | R31      | R51      | R71      |
|--------------------|----------|----------|----------|
| Deck <sub>11</sub> | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b> |
| Deck <sub>12</sub> | <b>D</b> | <b>E</b> | <b>F</b> |
| Deck <sub>13</sub> | <b>G</b> | <b>H</b> | <b>I</b> |
| Deck <sub>21</sub> | <b>J</b> | <b>K</b> | <b>L</b> |
| Deck <sub>22</sub> | <b>M</b> | <b>N</b> | <b>O</b> |
| Deck <sub>23</sub> | <b>P</b> | <b>Q</b> | <b>R</b> |



## 5.4 Ergebnisse und Diskussion

Um das Problem zu lösen, wurden die Zielfunktionen der 18 Kombinationen auch „manuell“ berechnet, mit dem Ziel die gefundenen Ergebnisse mit den Ergebnissen des Algorithmus zu vergleichen. Es wurde für jede Kombination relative Werte der Zielfunktionen kalkuliert, wobei der absolute Wert (100%-Wert) der höchst erreichte Wert bei der Biegesteifigkeit bzw. jeweils dem niedrigsten Wert bei den Kosten und der Masse zugeordnet ist. Anhand dieser relativen Werte wurde die jeweilige Kombination eingeordnet und geclustert. Ergebnis sind vier Gruppen: Gruppe 1 (A, G, J, P); Gruppe 2 (D, M), Gruppe 3 (B, H, K, Q), Gruppe 4 (E, I, N, R) und Gruppe 5 (C, F, L, O).

Der Algorithmus gibt direkt eine Tabelle mit allen Kombinationen und deren Rang aus. Für die Rangermittlung wurde die Methode der Nutzungswertanalyse nach [11] benutzt. Das Ergebnis findet sich in Tabelle 2.

Tabelle 2: Ergebnisse des Algorithmus

| Kombinationen | A | B | C  | D | E  | F  | G | H | I  |
|---------------|---|---|----|---|----|----|---|---|----|
| Platz         | 3 | 9 | 15 | 5 | 11 | 17 | 1 | 7 | 13 |

| Kombinationen | J | K  | L  | M | N  | O  | P | Q | R  |
|---------------|---|----|----|---|----|----|---|---|----|
| Platz         | 4 | 10 | 16 | 6 | 12 | 18 | 2 | 8 | 14 |

## 6 Ausblick und weitere Arbeiten

Das Ziel dieser Arbeit war die nicht-dominierenden Lösungen (Pareto-Menge) im Rahmen einer MKO mit Hilfe eines genetischen Algorithmus zu finden. Als Referenz dient eine mit analytischen Methoden händisch ermittelte Pareto-Menge. Festzuhalten ist, dass der Algorithmus die gleichen Ergebnisse liefert, wie die „manuell“ ermittelte Pareto-Menge. Mit beiden Methoden wurden vier nicht dominierte Lösungen gefunden. Damit ist eine prinzipielle Eignung von genetischen Algorithmen zur Identifikation einer Pareto-optimalen Sandwichkonfiguration nachgewiesen. Allerdings ist im Rahmen dieser Arbeit nur ein sehr überschaubarer Lösungsraum untersucht worden, um die Qualität der gefundenen Lösung bewerten zu können. Deswegen ist das Ergebnis dieser Arbeit lediglich als Startpunkt für

weitere, folgende Untersuchungen anzusehen, bei denen ein deutlich größerer Lösungsraum mit mehr als 1000 Kombinationsmöglichkeiten betrachtet werden soll.

## Literatur

- [1] A. Schuhmacher: *Optimierung mechanischer Strukturen. Grundlagen und industrielle Anwendungen*. 2. aktualisierte und erweiterte Auflage Berlin Heidelberg: Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-34700-9
- [2] B. Klein: *Leichtbau und neue Werkstoffe im Automobilbau*. Version 2013/12. Vorlesungsskript, Universität Kassel, Fachgebiet Leichtbau-Konstruktion
- [3] D. Zenkert: *Future Needs for sandwich structures research and development*. AJM Ferreira, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Sandwich Structure, Porto, pp 9-10
- [4] J. Pflug, I. Verpoest: *Sandwich Materials Selection Charts*. Journal of Sandwich Structures and Materials 8, pp 407-421
- [5] M. Ashby: *Multi-Objective Optimization in material design and selection*, Acta Materiala 48, pp. 359-369
- [6] D. Goldberg: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, Boston, MA, 1989
- [7] A. Mazahery, M. O. Shabani, A. Elrefaie: *Searching for the superior solution to the population-based optimization problem*. International Journal of Damage Mechanics 2014 23: 899 originally published online 22 April 2014, DOI: 10.1177/1056789513518951
- [8] B Sareni : *Conception simultanée par Optimisation des Systèmes D'énergie Electrique*. HDR, INP Toulouse, 2006
- [9] J.-D. Caprace, F. Bair, P. Rigo: *Multi-criteria Scantling Optimisation of Cruise Ships*. Ship Technology Research Schiffstechnik, VOL-/ NO -20
- [10] M. Ashby: *Materials Selection in Mechanical Design*. Third Edition. Italy: Elsevier, 2005
- [11] C. Zangemeister: *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – Eine Methodik zur multi-dimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*, Zangemeister & Partner, München, 1976

## Generalisierte Einbindung von Interaktionstechniken in Engineering-Anwendungen

Ralph Stelzer, Stephan Arndt, Erik Steindecker, Wolfgang Steger

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD, Technische Universität Dresden

IMM, Postfach 01062 Dresden

E-Mail: wolfgang.steger@tu-dresden.de; Internet: <http://www.tu-dresden.de>

**Inhalt:** Engineering-Anwendungen werden für gewöhnlich per Maus und Tastatur bedient. Demgegenüber nutzt VR (Virtual Reality) die Vorteile direkter Interaktionstechniken (z.B. haptische Eingabegeräte oder Datenhandschuhe) für das realistische und intuitive Erleben virtueller Prototypen.

Aufgabenabhängig ist es sinnvoll, die genannten Interaktionstechniken auch in Engineering-Anwendungen anzuwenden, wofür sich eine generalisierte Schnittstelle besonders gut eignet. Eine mögliche informationstechnische Basis stellt die im VR-Umfeld verbreitete VRPN-Bibliothek dar. Die Funktionalitäten von VRPN können für die Erzeugung, Speicherung, Übertragung sowie die (Weiter-)Nutzung von Interaktions- und Bewegungsdaten verwendet werden. In diesem Zusammenhang lässt sich ebenso die Interaktion mit digitalen Prototypen dokumentieren, indem Daten aufgezeichnet und bei Bedarf wiedergegeben werden.

Der Beitrag beschreibt beispielhaft VRPN-Implementierungen in die CAD-Anwendung SolidWorks und zeigt, welche verschiedenen Szenarien sich daraus ableiten lassen.

**Abstract:** Peripherals like mouse or keyboard usually are used for engineering applications. Otherwise VR (Virtual Reality) solutions benefit from interaction devices like haptic controller or dataglove that allow a realistic and intuitive experience of virtual prototypes.

Using VR-like interaction devices for engineering applications seems to be useful. Therefore a common, generalized interface has to be used to reduce the development effort.

The library VRPN is such an interface that enables the use of any interaction device which is supported. Data from interaction and motion activities can be created, stored, transferred and (re-)used for further work. Documentation topics can also be considered and implemented by using record and play back functions. The paper describes the adaption and extension of the VRPN concept to SolidWorks, a CAD-application.

**Stichwörter:** Eingabegeräte, VRPN, Wiederverwenden von Interaktions- und Bewegungsdaten

**Keywords:** input devices, VRPN, re-use of data from interaction and motion activities

## 1. Einleitung

Der Produktentwicklungs- oder Engineeringprozess ist besonders bedeutend für den Markterfolg eines Produkts. In diesem Prozess werden alle wesentlichen Merkmale des künftigen Produkts und ca. 80 % aller Kosten festgelegt [1]. Gegenwärtig wird angestrebt, das künftige Produkt durch seine physischen, funktionellen und organisatorischen Merkmale vollständig digital zu beschreiben und seine Eigenschaften mit Software- und Hardwarewerkzeugen zu verifizieren. Eine solche digitale Produktrepräsentation wird als virtueller Prototyp bezeichnet und ist Ziel vielfältiger Forschungsarbeiten [2].

Die Nutzung von VR-Umgebungen ist für Aspekte der Bewertung und des Erlebens eines virtuellen Prototyps sinnvoll. So können beispielsweise die Bedienung, Wartung und Schulung an einem größenechten und interaktiven, virtuellen Modell erprobt werden [3,4].

Verfahren der virtuellen und erweiterten Realität werden häufig bereits a priori als neue Interaktionsparadigmen definiert. In jedem Fall hat die Realisierung geeigneter Interfaces in VR-Umgebungen einen großen Einfluss auf Akzeptanz und Nutzen. Gleichzeitig wurde die Entwicklung von Interaktionsmethoden und Interaktionsgeräten durch VR- und Entertainmentszenarien vorangetrieben, da in VR-Umgebungen die am Desktop übliche Interaktion per Maus, Menü und Kommandozeile nicht einsetzbar ist. Vielmehr werden Interaktionsgeräte wie Microsoft Kinect Sensor, Xbox controller oder Systeme wie ART-TRACK oder intersense IS-9000 eingesetzt. Alle beispielhaft genannten Geräte besitzen eigene Treibersoftware und können auf unterschiedliche Weise in Anwendungen integriert werden.

Die im Engineeringprozess etablierten Interaktionstechniken nutzen die Potentiale von VR-Umgebungen dagegen bisher wenig. So können z.B. Datenhandschuhe für Geometriemodellierung bzw. -manipulation kaum eingesetzt werden.

Engineering-Anwendungen sind üblicherweise Desktop-Anwendungen und werden meist per Maus und Tastatur bedient. Dagegen erlauben neue Interaktionsgeräte direkte Manipulationen an virtuellen Objekten. Sie nutzen die menschlichen Interaktionsfähigkeiten im Greifraum und sind konventionellen Eingabetechniken teilweise überlegen.

An der Schnittstelle zwischen Engineering und VR sind Konzepte für die einfache Einbindung von Geräten und Interaktionstechniken zu entwickeln und zu vereinheitlichen. Eine weitere Forderung in einem sicheren, dokumentierten Engineeringprozess ist die Auf-

zeichnung und Wiedergabe von Interaktionsdaten, die bei der Erstellung und beim Test eines virtuellen Prototyps entstehen.

Eine mögliche informationstechnische Basis stellt die VRPN-Bibliothek dar. Die Funktionalitäten und Konzepte von VRPN können für die Erzeugung, Speicherung und Übertragung von Interaktions- und Bewegungsdaten genutzt werden.

## 2. VRPN

*Virtual Reality Peripheral Network* (kurz: VRPN) bezeichnet eine Open Source Bibliothek mit deren Hilfe sich Peripheriegeräte über eine generalisierte und auf Netzwerkprotokollen basierte Netzwerkschnittstelle in Anwendungen integrieren lassen. Die generische Client-Server-Architektur von VRPN verbindet Peripheriegeräte und VR-Anwendungen miteinander (siehe Abbildung 1).

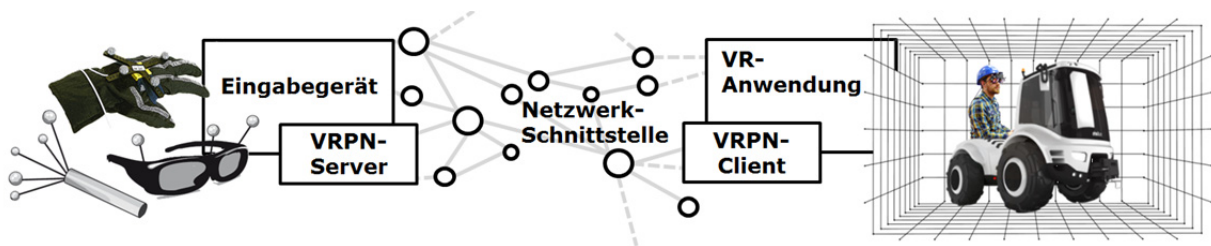


Abbildung 1: Das Grundkonzept von VRPN

Um ein Gerät per VRPN zu nutzen, müssen seine Funktionen, entsprechend einer verallgemeinerten Gerätebeschreibung in der VRPN-Bibliothek (sog. device type), bekannt sein. Dies ermöglicht eine standardisierte Kommunikation zwischen Geräten und Anwendung. Geräte mit gleichen Funktionen erscheinen nach „Außen“ einheitlich. Sie stellen gleichartige Ausgabewerte zur Weiterverarbeitung bereit.

Die wichtigsten common device types sind:

- *Tracker* für die Übertragung von Positions-, Orientierungs- und Bewegungsdaten (Geschwindigkeiten und Beschleunigungen)
- *Button* ermöglicht ein diskretes Eventhandling für ein oder mehrere Tasten
- *Analog* für die Übertragung von analogen Signalen

Neben den genannten common device types existieren weitere. Eine Liste kann unter [6] aufgerufen werden. VRPN lässt sich zudem auch mit eigenen device types erweitern. Dies bietet ein hohes Maß an Flexibilität: Neue Geräte werden schnell und mit wenig Aufwand von Anwendungen unterstützt und vorhandene Geräte können durch andere Geräte mit gleicher Funktionalität problemlos ersetzt werden.

Aus Anwendungssicht treten bei der Suche nach Beispielen vorrangig solche aus dem Bereich VR in den Vordergrund. Ein Großteil davon beschäftigt sich mit dem Erfassen von Positionen und Bewegungen. So zum Beispiel das Flexible Action and Articulated Skeleton Toolkit (kurz: FFAST) [7], welches mit 24 VRPN-Tracker devices ein menschliches Skelettmodell beschreibt. Jedem Gelenkpunkt ist ein Tracker zugeordnet. Die erforderlichen Bewegungsdaten werden aus den Bildern der Microsoft Kinect gewonnen.

[5] behandelt die Möglichkeit, alle Informationen zu sichern, die über die Client-Server-Verbindung des VRPN übertragen werden. Dies geschieht über eine Log-Datei, die genutzt wird, um gespeicherte Abläufe einer VR-Sitzung zu wiederholen oder die gespeicherten Daten gezielt zu analysieren. Das Erfassen von Interaktionsdaten mehrerer Anwender, die zusammenarbeiten, oder das Aufzeichnen von menschlichen Körperbewegungen zu Studienzwecken sind weitere Einsatzmöglichkeiten.

### **3. Implementierung von VRPN in eine CAD-Anwendung**

CAD-Anwendungen unterstützen nur eine stark begrenzte Anzahl von Eingabegeräten. Neben Tastatur und Maus ist die Verwendung des 3D Motion Controllers von 3Dconnexion sehr verbreitet [8]. Bei der Arbeit mit der CAD-Anwendung führt die ständige, konzentrierte Arbeit mit der Maus oft zu Fehlbelastungen und Fehlhaltungen des Konstrukteurs.

Unter Umständen lassen sich diese Erscheinungen durch den Einsatz von direkten und intuitiven Interaktionstechniken vermeiden. VRPN bietet hier einen praktikablen Weg, verschiedene Geräte zu untersuchen.

Durch die Erweiterungen der CAD-Anwendung um die VRPN-Funktionen werden alle VRPN-unterstützten Eingabegeräte einsetzbar. Die eingehenden Daten der Eingabegeräte können in der CAD-Anwendung beliebige Funktionen realisieren. Beispielsweise kann der Konstrukteur die Modellansicht durch Körperbewegungen verändern, um eine bessere räumliche Vorstellung des zu bearbeiteten Objekts zu erhalten. Die Zahl der notwendigen Mausbedienungen wird dadurch deutlich reduziert. Die traditionelle Steuerung per Maus bleibt jedoch weiterhin möglich. Hand und Arm werden entlastet.

Im konkreten Fall wurde in der CAD-Anwendung SolidWorks ein VRPN-Client implementiert, welcher derzeit die genannten common device types unterstützt.

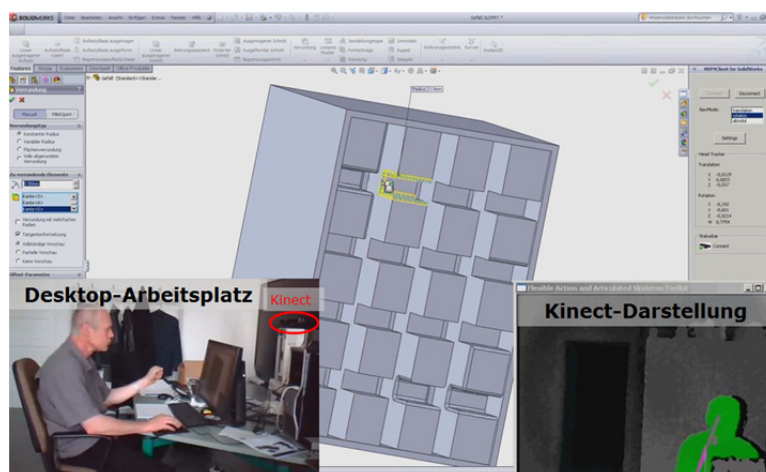


Abbildung 2: Steuerung der Modellansicht mithilfe von Head-Tracking

Abbildung 2 demonstriert den beschriebenen Anwendungsfall für die entwickelte Kamerasteuerung. Ein Konstrukteur erstellt die Verrundungen an einem Gussmodell. Zu verrundende Kanten werden per Mauseingabe selektiert.

Um verdeckte Kanten zu sehen und um die erzeugten Verrundungen zu prüfen, verändert der Konstrukteur durch Kopfbewegungen die Modellansicht.

In Abbildung 2 ist links unten der Arbeitsplatz des Konstrukteurs zu sehen. Mit dem Kamerasystem Microsoft Kinect erfolgt die Erfassung der Kopfbewegungen. Als VRPN-Server, zur Verarbeitung der Bewegungen und zum Senden der Daten, dient FAAST [7],

dessen Videoausgabe in Abbildung 2 rechts unten zu sehen ist. Einstellungen werden über ein VRPN-Add In in SolidWorks vorgenommen (rechte GUI-Leiste in Abbildung 2).

#### 4. Steuerung mehrerer Anwendungen durch VRPN

Neben der vorgestellten Übertragung der Interaktions- und Bewegungsdaten an eine Anwendung können die Daten auch an unterschiedliche Anwendungen gleichzeitig übertragen und von diesen verarbeitet werden. So kann beispielsweise ein Nutzer in einer VR-Umgebung direkt am virtuellen Prototyp arbeiten, während seine Bewegungen auf einen Avatar in einer anderen Anwendung übertragen werden. Alle Bewegungen und das Modell können damit von anderen Personen beobachtet werden. Dies ist besonders dann von Vorteil, wenn die beteiligten Personen räumlich voneinander getrennt sind.

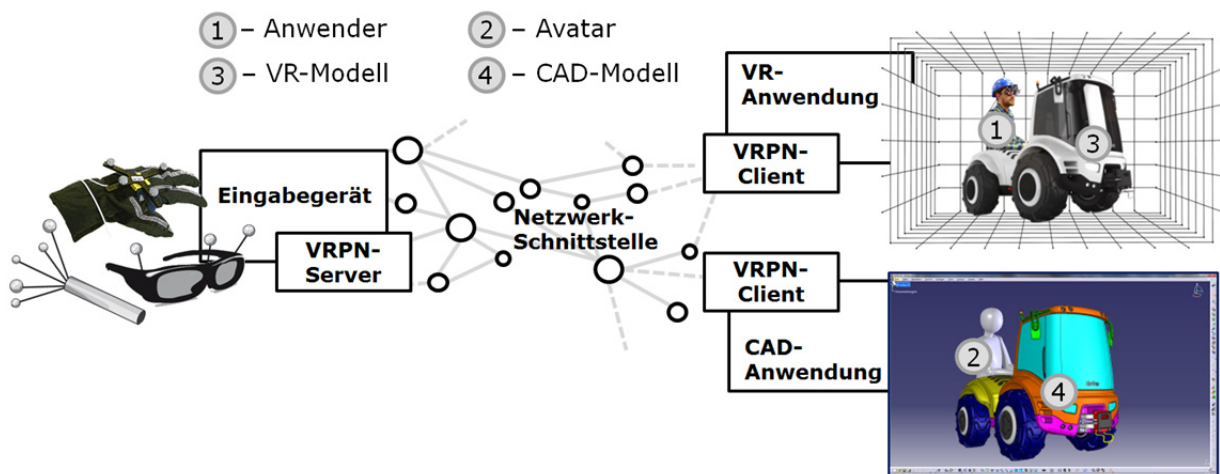


Abbildung 3: Gleichzeitiges Übertragen von Daten an unterschiedliche Anwendungen

Ein weiterer interessanter Aspekt ist, dass es sich bei der parallel laufenden Anwendung nicht zwingend um eine VR-Anwendung handeln muss. Abbildung 3 zeigt schematisch die gleichzeitige Übertragung von Daten an eine VR-Anwendung und eine CAD-Anwendung. Der Nutzer befindet sich in der VR-Umgebung und steuert diese mit den per VRPN eingebundenen Geräten. In der VR-Anwendung werden die Bewegungsdaten verwendet, um dem Nutzer die zu seiner Position passende Modellansicht bereitzustellen. Interagiert der Nutzer mit dem Modell, werden entsprechende Ereignisse ausgelöst. In der CAD-Anwendung werden die erfassten Bewegungen des Nutzers per VRPN auf einen Avatar übertragen. Ein Zuschauer kann die Aktionen des VR-Nutzers am CAD-Modell verfolgen und benötigt selbst keine VR-Anwendung.



Lage- und Positionsänderungen von Modellkomponenten werden nicht ohne weiteres vom VR ins CAD abgebildet. Eine mögliche Lösung ist die Ausstattung der betreffenden Komponenten mit VRPN-devices. Diese Verfahrensweise kann auch genutzt werden, um Ergebnisse von Bewegungssimulationen aus der CAD-Anwendung in der VR-Umgebung zu visualisieren.

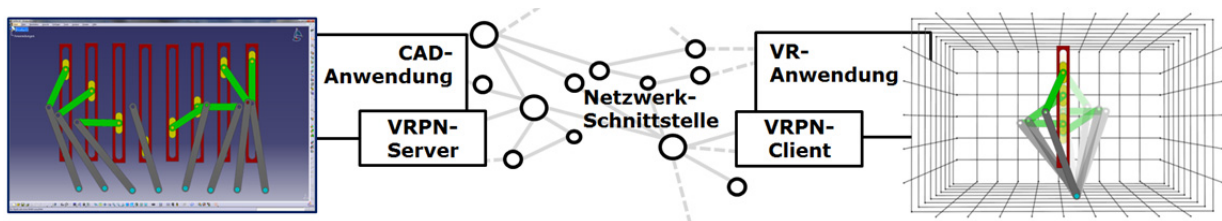


Abbildung 4: Übertragen von Daten einer Bewegungssimulation an eine VR-Anwendung

Abbildung 4 zeigt eine derartige Verbindung von CAD- und VR-Anwendung durch VRPN. Die CAD-Anwendung ersetzt in diesem Fall das Interaktionsgerät und ist damit in der Lage, VRPN-Daten zu erzeugen und die parallel laufende VR-Szene zu steuern.

Ähnlich wie beim Übertragen einer Bewegungssimulation per Keyframe-Datei [9] sind keine Beziehungen zwischen den Komponenten des Modells im VR notwendig. Die aktuelle Position der Komponenten wird per VRPN synchron und in Echtzeit übermittelt.

## 5. Wiederverwenden von Bewegungs- und Interaktionsdaten

Neben der synchronen Übertragung von VRPN Daten ist in der Produktentwicklung auch eine asynchrone Nutzung interessant. Das bedeutet, dass Interaktions- und Bewegungsdaten gespeichert und für die Wiederverwendung bereitgestellt werden. Zur Absicherung bzw. Dokumentation von Entwicklungsschritten lassen sich damit:

- Bewegungen speichern und zu einem späteren Zeitpunkt wieder abspielen,
- Interaktionsfolgen nachvollziehen und reproduzieren,
- Abläufe wiederholen und in anderer Anwendungen übertragen
- Untersuchungen am virtuellen Prototyp im PLM archivieren.

Es wurde eine VRPN-Anwendung entwickelt, welche beliebige VRPN-Datenströme aufzeichnen und wiedergeben kann. Die Anwendung verfügt über zwei getrennte Programmteile, den Player und den Rekorder.

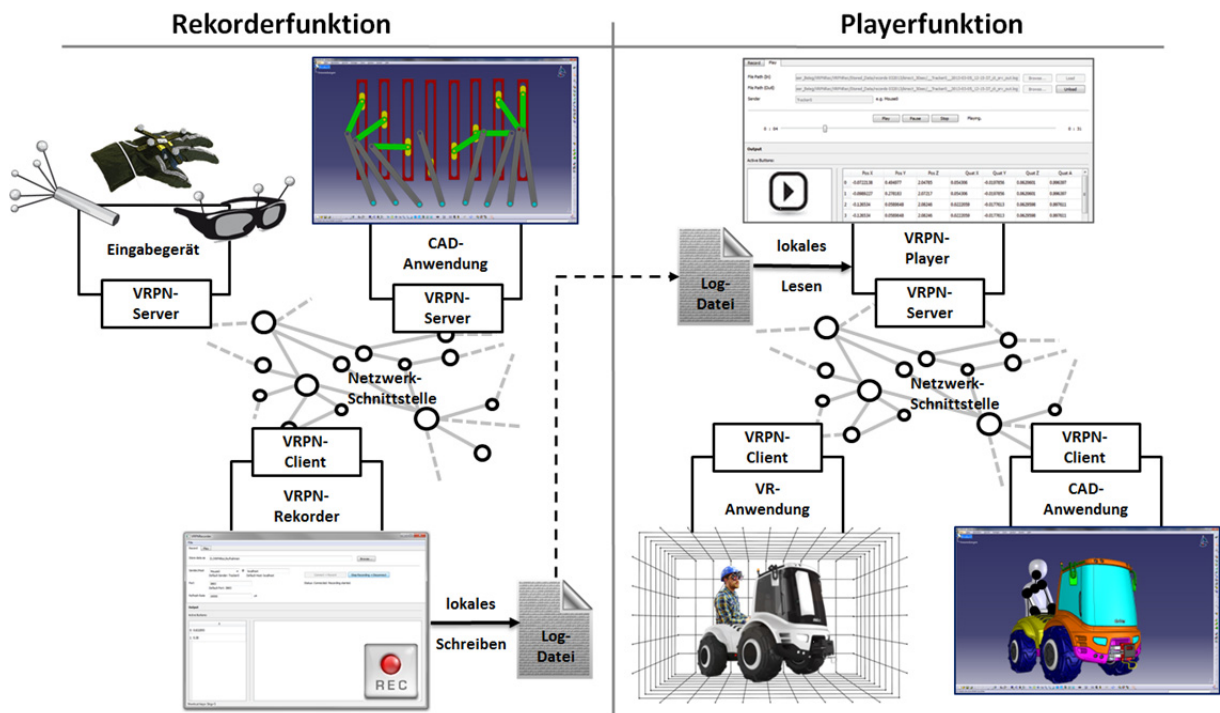


Abbildung 5: Rekorder- und Playerfunktion dienen der Dokumentation von Entwicklungsschritten

Abbildung 5 (linke Seite) zeigt den Rekorder in einem VRPN-Netzwerk. Der Rekorder stellt einen speziellen VRPN-Client dar, der den VRPN-Datenverkehr aus unterschiedlichen Quellen empfängt und in eine Log-Datei schreibt. Sollen gleichzeitig mehrere Quellen aufgezeichnet werden, muss für jede Quelle eine eigene Programminstanz gestartet werden. Die Anwendung unterstützt derzeit die device types Button, Analog und Tracker.

Zum Abspielen bzw. Senden einer zuvor eingelesenen Log-Datei in das VRPN-Netzwerk wird diese in den Player geladen (Abbildung 5, rechte Seite). Im gezeigten Fall werden die Daten gleichzeitig von einer VR-Anwendung und einer CAD-Anwendung über das Netzwerk empfangen und in den Anwendungen verarbeitet. Das Senden kann an einer frei wählbaren Stelle gestartet oder gestoppt werden.

Mit dem Rekorder können in einer VR-Anwendung Bewegungssequenzen aufgezeichnet werden, die ein Nutzer am Modell ausführt. Diese Sequenzen können anschließend kombiniert oder kopiert werden, um zum Beispiel Handlungen mehrerer Personen darzustellen.

## 6. Fazit

VRPN ist eine generische Geräteschnittstelle, die verschiedene Eingabegerätetypen (sog. device types) unterstützt und deren Zustände per Netzwerkprotokoll an eine oder mehr Anwendungen überträgt.

Es hat sich gezeigt, dass VRPN nicht nur als Geräteschnittstelle in VR-Anwendungen einsetzbar ist. Unterschiedliche Engineering-Anwendungen, die an der Erstellung und Bearbeitung eines virtuellen Prototyps beteiligt sind, lassen sich gleichfalls miteinander verbinden. So sind zum Beispiel VR-zu-VR, VR-zu-CAX oder CAX-zu-VR Kopplungen denkbar. Das Vorgehen ist immer dann sinnvoll, wenn Bewegungs- und Interaktionsdaten zu übertragen sind und die Modelle in beiden Anwendungen sich gleichen. Als Datenquellen können reale Eingabegeräte oder Modellobjekte der sendenden Anwendung dienen.

Bewegungsabläufe und Interaktionen können aufgezeichnet, wiederverwendet und verteilt werden, wodurch zeitaufwendige Arbeitsschritte bei sich wiederholenden Ausführungen entfallen. Die Arbeit mit dem virtuellen Prototyp ist zudem durch die Möglichkeit des Abspeicherns besser dokumentierbar.

Jede Untersuchung in einer VR-Umgebung ist durch Interaktionen mit einem Modell charakterisiert. Ohne besondere Maßnahmen erfasst VRPN jedoch nur die Interaktion und nicht den Modellzustand. Relevante Zustandsänderungen können bei Bedarf über die Ausstattung von Modellkomponenten mit VRPN-devices erfasst werden.

Interaktive VR-Umgebungen werden in vielen Bereichen eingesetzt. Die vorgestellten Szenarien lassen sich beispielhaft auf medizinische Trainingssysteme für Operationsplanungen, oder -schulungen übertragen.

## Literatur

- [1] Eigner, M, and Stelzer, R., 2008, "Product lifecycle management", Springer, London, pp. 9-25
- [2] Zorriassatine, F., and Wykes, C., and Parkin R., and Gindy, N., 2003, "A survey of virtual prototyping techniques for mechanical product development", Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of engineering manufacture, pp. 513-530
- [3] Jayaram, S., and Vance, J. and Gadh, R., and Jayaram, U., and Srinivasan, H., 2001, "Assessment of VR Technology and its Applications to Engineering Problems", Journal of Computing and Information Science in Engineering, pp. 72-83
- [4] Kunz, A., and Wegner, K., 2013, "Towards Natural User Interfaces in VR/AR for Design and Manufacturing", 2nd Conference on Research and Use of VR/AR Technologies of the Professorship for Machine Tools and Forming Technology at the Chemnitz University of Technology, pp. 23-34
- [5] Taylor II, R. M., and Hudson, T. C., and Seeger, A., and Weber, H., and Juliano J., and Helser, A. T., 2001, "VRPN: A Device-Independent, Network-Transparent VR Peripheral System", VRST 2001 conference paper, VRST '01 Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology, pp. 55-61
- [6] Taylor II, R. M., "Virtual Reality Peripheral Network", 2014, Web: <http://www.cs.unc.edu/Research/vrpn>
- [7] Suma, E.A., and Lange, B., and Rizzo, A., and Krum, D. M., and Bolas, M., 2011. "FAAST: Flexible Action and Articulated Skeleton Toolkit," proceedings of IEEE Virtual Reality, pp. 247-248
- [8] 3Dconnexion, „3Dconnexion: All Supported Software“, 2014, Web: <http://www.3dconnexion.com/supported-software/software0.html>
- [9] Witkin, A., and Popovic, Z., 1995, "Motion Warping", Proceedings of the 22Nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp. 105-108

## Finite Elemente Analyse auf Android

**Dipl.-Ing. Daniel Goller, Christian Glenk, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg**

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth

E-Mail: daniel.goller@uni-bayreuth.de; christian.glenk@uni-bayreuth.de

Internet: <http://www.lscad.de>

**Inhalt:** Im folgenden Beitrag wird das Konzept und die Entwicklung einer Finiten Elemente App für Android beschrieben, sowie die dafür verwendete Softwareumgebung.

**Abstract:** This paper describes the concept and development of a finite element app for android, as well as the software environment that was used.

**Stichwörter:** Finite Elemente Analyse, Android, App, C#, .NET, Z88Aurora

**Keywords:** Finite Elemente Analysis, Android, App, C#, .NET, Z88Aurora

### 1 Einleitung

Die Finite Elemente Analyse hat sich seit vielen Jahren in den Ingenieurwissenschaften bewährt und ist heute oft als fester Bestandteil in simulationsbasierten Entwicklungsprozessen anzutreffen. Eine Simulation besteht meist aus dem Präprozessing, in dem die Ausgangparameter der Studie, wie beispielsweise die Geometrie und die Randbedingungen, festgelegt werden. Anschließend wird die Aufgabenstellung vom Solver berechnet und die Ergebnisse im Postprozessor dargestellt. Dieses Vorgehen liegt auch der am Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD entwickelten, freien Finite Elemente Analyse Software Z88Aurora zugrunde.

Die schnelle Entwicklung der Computertechnik und der wachsende verfügbare Speicher erlauben es, immer detailliertere und komplexere Probleme mit diesem Verfahren zu lösen. Im Folgenden wird die Entwicklung einer Android App beschrieben, die es ermög-

licht, einfache strukturmechanische Aufgabenstellungen zu lösen, um in diesem Bereich erste Schritte auf einer neuen Plattform zu gehen.

## 2 Android OS

Android ist ein weit verbreitetes Betriebssystem, das hauptsächlich auf mobilen Endgeräten eingesetzt wird, aber auch für PCs oder Notebooks verfügbar ist. Es wird offiziell seit 2007 von Google entwickelt, das erste Handy mit Android Betriebssystem wurde 2008 ausgeliefert [1]. Seitdem setzt es sich immer mehr am Markt durch und ist heute das verbreitetste Betriebssystem für Mobiltelefone. Im zweiten Quartal 2014 liefen von allen ausgelieferten mobilen Geräten 84,7 % mit Android [2]. Der hohe Marktanteil liegt zum einen daran, dass Android das erste mobile Betriebssystem war, das für Mobiltelefonhersteller kostenlos angeboten wurde, zum anderen an der quelloffenen Entwicklung. Dies bringt nicht nur Transparenz, sondern auch einen technologischen Innovationsschub. Dadurch, dass viele Hersteller die gleiche Softwarebasis verwenden, spielt sich der größte Teil des Wettbewerbs im Bereich der Hardware ab, wodurch die Hersteller gezwungen sind, sich durch stetige Verbesserungen und Innovationen am Markt zu behaupten [1].

Applikationen sind auf einem Android Betriebssystem modular aufgebaut und relativ lose gekoppelt. Einzelne Komponenten wie z. B. die Tastatur oder die Kamerasoftware können sehr einfach ausgetauscht oder erweitert werden. Für Entwickler stellt die Plattform zahlreiche Funktionen zur Verfügung, um die in den mobilen Endgeräten vorhandenen Sensoren wie z. B. das GPS, die Kamera, das Mikrofon oder den Beschleunigungssensor anzusteuern, sowie Signale der Touch-Oberfläche auszuwerten. Jede Android App läuft in einer eigenen VM (virtuellen Maschine), ähnlich der Java VM, um den Prozess und die Anwendungsdaten zu schützen und die Ausführbarkeit anderer Anwendungen nicht zu beeinträchtigen.

Die grafische Oberfläche, die der Nutzer bedient, wird durch sog. Activities erzeugt. Jede Ansicht ist eine eigene Activity. Nachdem eine Activity vom System aufgebaut wurde, wird sie dem Nutzer am Display angezeigt und dieser kann mit ihr interagieren. Nach dem Start einer neuen Activity gerät die vorhergehende in den Hintergrund, liegt aber trotzdem weiterhin im Speicher. Das System beendet die Activities und damit auch die Anwendungen selbst, wenn der Speicher oder die Rechenressourcen benötigt werden. Der Entwickler kann durch sogenannte Intents auch Activities anderer Applikationen aufrufen, Daten

übergeben und Rückgabewerte empfangen. Dies ist z. B. sinnvoll wenn in der App eine Datei geladen werden soll. Statt den Pfad per Hand einzugeben kann auch die Activity eines installierten Dateimanagers gestartet werden. So kann der Nutzer die Datei bequem mit Hilfe der grafischen Anzeige des Dateimanagers suchen und auswählen und die eigene Applikation erhält den Pfad als Rückgabewert.

### **3 Entwicklung einer Finiten Elemente App**

Um eine Finite Elemente Analyse auf einem Android Gerät durchzuführen und damit die Möglichkeiten und Grenzen dieses Betriebssystems in diesem Bereich zu ermitteln, wird eine App entwickelt, die einfache strukturmechanische Probleme mit Hilfe der FEA lösen kann.

Die Zielgruppe einer solchen App sind z. B. Studenten, die sich mit den Grundlagen der FEA beschäftigen und dies in der Vorlesung oder Zuhause auf Android Geräten testen wollen. Durch das Erstellen und Berechnen einfacher 2D Balkenstrukturen werden grundlegende Effekte wie Spannungsverteilung oder Verschiebungen im Lastfall analysiert und erlernt.

#### **3.1 Werkzeuge**

Zum Entwickeln von Android Anwendungen wird das Android SDK (Software Development Kit) und eine Entwicklungsumgebung benötigt. Hier gibt es viele Möglichkeiten, die sich jeweils für unterschiedliche Anwendungsfälle eignen. Im Folgenden werden die Tools beschrieben, die für die FEA App verwendet wurden.

##### **Android SDK**

Das Android SDK wird kostenlos von Google zur Verfügung gestellt. Darin enthalten ist die API (Application Programming Interface), um auf die Funktionen des Betriebssystems zuzugreifen. Zudem sind im SDK Tools enthalten, die einige Aufgaben des Entwicklungsprozesses unterstützen, wie z. B. das Testen oder Debuggen des Codes. [3]

##### **.NET-Framework**

Das 2002 von Microsoft veröffentlichte .NET-Framework ermöglicht objektorientiertes Programmieren mit unterschiedlichen Sprachen (z. B. C++, C#, VB oder JScript) unter

Windows. Der Compiler erzeugt dabei Bytecode der nur mit der .NET CLR (Common Language Runtime), dem Interpreter, ausführbar ist. In .NET werden Konzepte aus der Programmiersprache Java aufgegriffen, in der native Android Applikationen geschrieben werden.

Im Framework ist eine umfangreiche Funktionsbibliothek in Form einer Klassenbibliothek enthalten, um die Entwicklung von Anwendungen zu beschleunigen. Die Installation beinhaltet über 10.000 Typen, unter anderem Klassen für den Umgang mit Zeitfunktionen, mathematischen Operationen, Oberflächenprogrammierung und Web-Anwendungen. Damit ist das .NET-Framework ein effizientes Werkzeug der Softwareentwicklung. [4]

### **Xamarin**

Da die für .NET Anwendungen zum Ausführen nötige CLR nur auf Windows verfügbar war, gab es bereits 2001 Bestrebungen, diese auch auf Unix Systeme sowie iOS zu portieren. 2004 wurde Mono veröffentlicht, ein open source Projekt, das einen C# Compiler und die CLR für nicht-Windows Systeme bietet. Dies ermöglicht die Nutzung eines großen Teils der .NET Bibliothek auf Betriebssystemen wie Unix, iOS oder auch Android. Eine Firma namens Xamarin leitet die Verwaltung und Weiterentwicklung des Frameworks.

Mit Hilfe von Mono lassen sich unter Verwendung des .NET-Frameworks in C# plattformübergreifend mobile Anwendungen entwickeln. Dafür stellt Xamarin auch die Entwicklungsumgebung Xamarin Studio zur Verfügung. Durch „shared code“ können die logischen Vorgänge für Android genauso wie für iOS verwendet werden, lediglich die Oberfläche muss für jedes System gesondert erstellt werden.

Neben Xamarin gibt es auch Alternativen zur plattformübergreifenden Entwicklung von Apps, die auf anderen Verfahren basieren. Beispiele hierfür sind PhoneGap (HTML 5, jQuery Mobile, CSS), Appcelerator Titanium (ähnlicher Ansatz wie PhoneGap) oder RhoMobile Rhodes (Ruby-Framework). Bei diesem Projekt fiel die Entscheidung vor allem wegen der Programmiersprache C# und die damit verbundene Möglichkeit, bereits existierenden Code weiterzuverwenden, auf Xamarin.

### **OpenGL**

Die Grafikkbibliothek OpenGL ist auf Android als OpenGL ES (Open Graphics Library for embedded Systems) verfügbar. Dies ist eine vereinfachte Form von OpenGL, in der



z. B. redundante Befehle entfernt wurden. Bei der Entwicklung von Anwendungen mit Mono bzw. dem .NET Framework kann mit Hilfe des OpenGL Wrappers OpenTK (Open Toolkit Library) darauf zugegriffen werden. Dieses, in C# geschriebene Modul, ist für die verbreitetsten Plattformen verfügbar und ermöglicht den Zugriff auf OpenGL Funktionen aus allen Sprachen, die das .NET Framework unterstützt.

### **3.2 Vorgehen**

Um das Projekt umzusetzen, muss ein Backend mit dem Solver und der Dateiverwaltung erstellt werden, sowie eine GUI (Graphical User Interface) als Frontend, die den Nutzer durch das Präprozessing führt und im Postprozessing die Ergebnisse aufbereitet darstellt.

#### **Solver**

Als Solver wird ein Modul verwendet, das von Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg geschrieben wurde und das Gleichungssystem nach der Methode von Cholesky mit in-situ Speicherung löst. Die Strukturdaten sowie Materialparameter und Randbedingungen werden in einer Dateistruktur gespeichert, die der von Z88Aurora gleicht. Ergebnisse wie Spannungen, Kräfte und Verschiebungen werden jeweils in ähnlichen Dateien im Android Dateisystem abgelegt. [5]

#### **Oberfläche**

Die Oberfläche stellt eine Herausforderung dar, da sie die Schnittstelle zum Nutzer bildet. So kann eine ineffiziente Ansteuerung die entwickelte Software unbrauchbar machen, selbst wenn der dahinterliegende Rechenkern sehr gut ist. Deshalb ist es wichtig, dass alle Funktionen und Optionen so in der GUI integriert sind, dass der Nutzer sich möglichst schnell in das Programm einarbeiten und es anschließend mit möglichst geringem Zeitaufwand verwenden kann. Um diese Ansprüche für Einsteiger und erfahrenere Nutzer gleichermaßen umzusetzen, wird ein entwickeltes Konzept umgesetzt, das es ermöglicht beiden Nutzergruppen gerecht zu werden. Zudem ist in die Oberfläche eine OpenGL Zeichenebene integriert, in der der Nutzer durch Gestensteuerung Balkenstrukturen, bestehend aus Knoten und Elementen, zeichnen kann.

## Konzept

In jeder Activity stehen zwei Modi zur Verfügung. Im Basis Modus ist der Nutzer in seinen Möglichkeiten eingeschränkt, kann jedoch schon durch wenige einfache Eingaben eine 2D-Balkenstruktur erstellen und rechnen. Im Detail Modus ist es möglich, jeden einzelnen Parameter der Analyse selbst zu definieren. So können beispielsweise 3D Raumkoordinaten erstellt oder die Biegeträgheitsmomente von Balkenstrukturen explizit eingegeben werden. Es kann jederzeit zwischen den beiden Modi gewechselt werden, allerdings wird für jeden Modus eine eigene Struktur angelegt.



Abbildung 1: Symbole für die verfügbaren Modi

Um den Nutzer durch das Präprozessing zu leiten, werden verschiedenen Activities nach der Reihe aufgerufen, ohne die Möglichkeit wichtige Einstellungen zu überspringen.

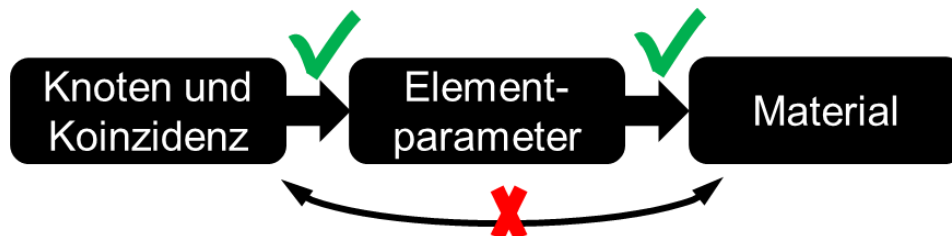


Abbildung 2: Vorgegebener Workflow

Der Nutzer kann sich nur entlang des vorgegebenen Workflows bewegen, damit sichergestellt ist, dass der Solver alle notwendigen Daten erhält um das FE-Problem zu lösen.

Die App sollte möglichst viele Vorteile des Android Systems wie z. B. die Möglichkeit der Gestensteuerung durch das Touch Display (Balkenstrukturen zeichnen) nutzen. Zudem ist die App komplett in Englisch gehalten, um sie einem breiteren Publikum zugänglich zu machen.

## 4 Nutzung der App

Nach dem Starten der Anwendung findet sich der Nutzer im Hauptmenü mit folgenden Funktionen wieder:

- „Enter Structure“: Erstellen einer neuen Struktur oder Bearbeiten einer bereits erstellten/ geladenen.
- „Load Structure“: Laden eines Projektes mit Struktur und Randbedingungen aus dem Android Dateisystem.
- „About“: Informationen über die Herausgeber.
- „Help“: Ausführliche Hilfsdokumente, die über das Internet zur Verfügung gestellt werden.

Der Workflow vom Erstellen einer Struktur bis zur Darstellung der Ergebnisse im Postprozessor ist in Abbildung 3 dargestellt. Dabei sind die vier Activities „Nodes and Elements“, „Element Geometry“, „Material Data“ und „Boundary Conditions“ zu durchlaufen. Wird ein Projekt geladen, können auch eine oder mehrere dieser Activities übersprungen werden, je nachdem wie viele Informationen nach dem Laden zur Verfügung stehen.

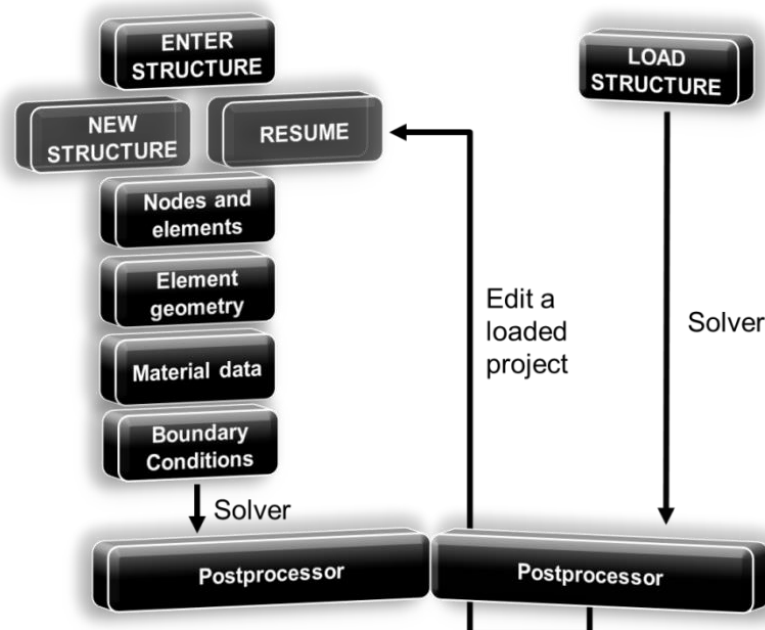


Abbildung 3: Prozess vom Erstellen/ Laden einer Struktur bis zum Postprozessor

Als Beispiel für eine Activity ist in Abbildung 4 die Basisansicht von „Nodes and Elements“ dargestellt.



Abbildung 4: Ansicht der Activity „Nodes and Elements“

## 5 Ausblick

Nach dem Abschluss der Entwicklung und ausführlicher Tests, soll die App kostenlos im Google Playstore und ähnlichen Plattformen zur Verfügung gestellt werden. Zudem kann dann die Leistungsfähigkeit der verwendeten Hard- und Softwareumgebung auf die Probe gestellt werden, indem größere Projekte importiert und gerechnet werden, um so Grenzen und Chancen, die dieses relativ junge Betriebssystem bringt, besser einschätzen zu können.

## Literatur

- [1] McClure, Wallace; Blevins, Nathan; Croft, John; Dick, Jonathan; Hardy, Chris: Professional Android Programming, Indianapolis, Ind.: Wiley Pub., 2012
- [2] IDC Corporate USA: Worldwide Smartphone Shipments Edge Past 300 Million Units in the Second Quarter. <http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS25037214> (15.09.2014)
- [3] Google Inc.: Android Developers. <http://developer.android.com> (15.09.2014)
- [4] Wenger, Rolf: Handbuch der .NET-Programmierung, Unterschleißheim: Microsoft Press, 2007
- [5] Rieg, Frank; Alber-Laukant, Bettina; Hackenschmidt, Reinhard: Finite Elemente Analyse für Ingenieure, 4. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2012

# Integrierte Betrachtung von temporären Mischreibungsgebieten bei der Simulation hydrodynamisch wirkender Radialgleitlager - Ansätze für das System SIRIUS

**Stefan Zorn, Klaus Brökel**

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/ CAD, Universität Rostock

Albert-Einstein-Strasse 2, 18059 Rostock

E-Mail: stefan.zorn@uni-rostock.de; Internet: <http://www.kt.uni-rostock.de>

**Inhalt:** Für die Berechnung und Simulation von hydrostatisch und hydrodynamisch wirkenden Radialgleitlagern wurde an der Universität Rostock das Programm SIRIUS entwickelt. Dieses Programm konnte bereits bei unterschiedlichen Forschungsvorhaben verifiziert werden. Der Umfang der dort realisierten Funktionalitäten wird kurz beschrieben, bevor eine Betrachtung verschiedener wissenschaftlicher Ansätze für die Berücksichtigung von auftretenden Mischreibungsgebieten bei kritischen Spalthöhen erfolgt. Im Speziellen werden dabei die in SIRIUS implementierbaren Möglichkeiten genauer betrachtet.

**Abstract:** SIRIUS is a software product, developed by the University of Rostock for the simulation of hydrostatic and hydrodynamic journal bearings. SIRIUS has been evaluated in several research projects. Most bearings operate in the regime of mixed friction where the mechanism of hydrodynamic filmformation is affected by surface structure and deformation. This paper discusses different mixed- lubrication models and estimates which will be the best to extend the opportunities of SIRIUS.

**Stichwörter:** hydrodynamische Gleitlager, Elastohydrodynamische Schmierung, Kavitation, Mischreibung, Festkörperkontakt

**Keywords:** hydrodynamic journal bearings, elastohydrodynamic lubrication, cavitation, mixed friction,

## 1 Ausgangssituation

Für die Berechnung von hydrodynamisch und hydrostatisch wirkenden Radialgleitlagern existiert an der Universität Rostock das Simulations- und Berechnungstool SIRIUS. Dieses wurde seit den 70iger Jahren sukzessiv weiterentwickelt und überarbeitet, sodass ein leistungsfähiges Tool für die schnelle Auslegung und Dimensionierung von Radialgleitlagern entstanden ist. SIRIUS konnte bereits in mehreren Projekten erfolgreich als Auslegungstool validiert werden. Ausgangspunkt für die schnelle Berechnung sind dabei die einfachen (linearisierten) Algorithmen und eine ideal getrennte Betrachtung der Reibungszustände. Die Berechnung der Gleitlager erfolgt im System

SIRIUS unter dem Gesichtspunkt reiner Flüssigkeitsreibung im Betrieb und glatter Oberflächen (Makrohydrodynamik). Um den immer größer werdenden Anforderungen an die Gleitlager Rechnung zu tragen, ist diese Betrachtungsweise für eine genaue Vorhersage zu überdenken. In der Realität tritt der ideale Fall der reinen Flüssigkeitsreibung nur sehr selten auf, sodass das Lager die meiste Zeit im Betriebszustand der Mischreibung verweilt. Mischreibung wird hier als gleichzeitiges Auftreten von Flüssigkeits- und Festkörperreibung definiert. Der Forschungstrend in der Gleitlagerentwicklung geht im Allgemeinen zur Beachtung von partiellen Mischreibungsgebieten sowie zur Vorhersage des daraus resultierenden Verschleißverhaltens und einer genaueren Lebensdauervorhersage. Der erste Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit den relevanten wissenschaftlichen Ansätzen zur Berücksichtigung von Mischreibung in der Simulation hydrodynamisch wirkender Radialgleitlager, welche den aktuellen Stand der Technik widerspiegeln. Danach erfolgt eine kurze Erläuterung zum System SIRIUS sowie den dort realisierten Funktionen. Dies dient als Ausgangspunkt um abzuschätzen, welche Vorgehensweise für die Umsetzung in SIRIUS geeignet sein könnte.

## **2 Betrachtung partieller Mischreibungsgebiete**

In einer vorangegangenen Arbeit [1] wurden bereits die gängigen Vorgehensweisen zur Dimensionierung und Berechnung von hydrodynamisch und hydrostatisch wirkenden Radialgleitlagern unter Betrachtung der Makrohydrodynamik dargestellt. Ausgangspunkt aller Ansätze ist dabei die Reynolds'sche Differentialgleichung (R-DGL). Die ausführliche Herleitung aus der Navier-Stokes-Gleichung ist schon mehrfach in der Literatur [2] [3] beschrieben worden. Für ein endlich breites Lager mit inkompressibler, laminarer Strömung und Newton'schem Fluidverhalten lautet die R-DGL wie folgt (1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta \left[ u_S \frac{\partial h}{\partial x} + 2 \frac{\partial h}{\partial t} \right] \quad (1)$$

Sie Variablen  $x$  und  $z$  stellen hierbei die Koordinaten in Umfangs- bzw. in Axialrichtung,  $\eta$  die dynamische Viskosität und  $h$  die lokale Schmierstalthöhe dar. Der Druck ist durch  $p$  gegeben.

## 2.1 Beachtung von Kavitationseffekten

Die Druckberechnung mit der klassischen Reynolds'schen Differentialgleichung liefert sowohl positive als auch negative Drücke. Da die Schmierstoffe aber keine nennenswerten Zugkräfte übertragen können, wird versucht über verschiedene Randbedingungen diese Problematik zu lösen. Beispiele hierfür sind die Gümbel'schen, die Sommerfeld'schen und die Reynolds'schen Randbedingungen, welche allerdings die Masseerhaltung verletzen und die auftretenden Kavitationseffekte im sich erweiternden Schmierpalt ausser Acht lassen.

Der aktuelle Stand der Technik in der Simulation von Gleitlagern ist die Berechnung sowohl unter Berücksichtigung von Kavitationseffekten als auch unter Einbeziehung der elastischen Verformung (EHD -Elastohydrodynamik) aufgrund der Druckerzeugung im Schmierpalt [4], [5], [6], [7]. Die auftretenden Kavitationseffekte können entweder mit Hilfe der von JACOBSON-FLOHBERG und OLSSON entwickelten Algorithmen (JFO-Modell) oder mit Hilfe der erweiterten Schmiertheorie nach WEGMANN (siehe 3.1) berücksichtigt werden.

Um den Kavitationserscheinungen Rechnung zu tragen erweitern JACOBSON-FLOHBERG und OLSON die R-DGL um den Füllungsgrad  $g$ . Dieser beachtet die Auftrennung des Schmiermittels in die flüssige und gasförmige Phase. Die angepasste R-DGL mit den Randbedingungen nach JFO lautet wie folgt (2):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3 g}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^3 g}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta \left[ (u_1 - u_2) \frac{\partial(hg)}{\partial x} + 2u_2 g \frac{\partial h}{\partial x} + 2 \frac{\partial(hg)}{\partial t} \right] \quad (2)$$

Erläuterungen zur erweiterten Schmiertheorie nach WEGMANN erfolgen im Kapitel 3.1 bei der Beschreibung von SIRIUS.

## 2.2 Berücksichtigung rauer Oberflächen

In der Realität weisen alle technischen Oberflächen eine Rauheit bzw. eine Mikrostrukturierung auf. In Gleitlagern können deren Amplituden durchaus in der Größenordnung der im Betrieb auftretenden Schmierpaltheiten liegen. Unterschreitet die Schmierfilmdicke im Gleitlager die kritische Spalthöhe (Betrag der Amplituden der Rauheitsspitzen) kommt es zu Festkörperkontakten an den Rauheitsspitzen. Der Einfluss der Mikrostrukturierung gewinnt enorm an Bedeutung und ist nicht mehr vernachlässigbar. Sehr kleine Filmdickenänderungen haben nun einen großen Einfluss auf die

hydrodynamische Druckerzeugung und somit auf das Verschleißverhalten und die Lebensdauer [8].

Eine große Herausforderung bei der Betrachtung rauer Oberflächen in hydrodynamisch geschmierten Gleitkontakten ist die Zufälligkeit der Oberflächenstruktur. In den letzten 30 Jahren wurden verschiedene grundlegende Modellansätze entwickelt, welche versuchen dieses Problem zu lösen. Grundlegend gibt es zwei verschiedene Ansätze: den **stochastischen Modellansatz** und den **deterministischen Modellansatz**.

Das stochastische Modell nutzt eine geringe Zahl ausgewählter stochastischer Parameter um die Oberflächen zu beschreiben. Durchgesetzt hat sich der Ansatz von PATIR und CHENG [9] aus dem Jahre 1978. Sie berücksichtigen den Einfluss der Oberflächentopologie indem sie die Reynolds'sche Differential Gleichung um die Flussfaktoren  $\varphi_x$ ,  $\varphi_z$  und  $\varphi_s$  erweitern (3). Diese dienen als Korrekturfaktoren und ergeben sich aus der Flussbilanz der Scher- und Druckströme.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \varphi_x h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \varphi_z h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta \left[ (u_1 + u_2) \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} + (u_1 + u_2) \sigma \frac{\partial \varphi_s}{\partial x} + 2 \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \right] \quad (3)$$

Ausgehend von der Orientierung der Oberflächenrauheiten kann eine Charakterisierung der Oberfläche über den sogenannten Peklinikfaktor  $\gamma$  (Abbildung 1) erfolgen. [10]

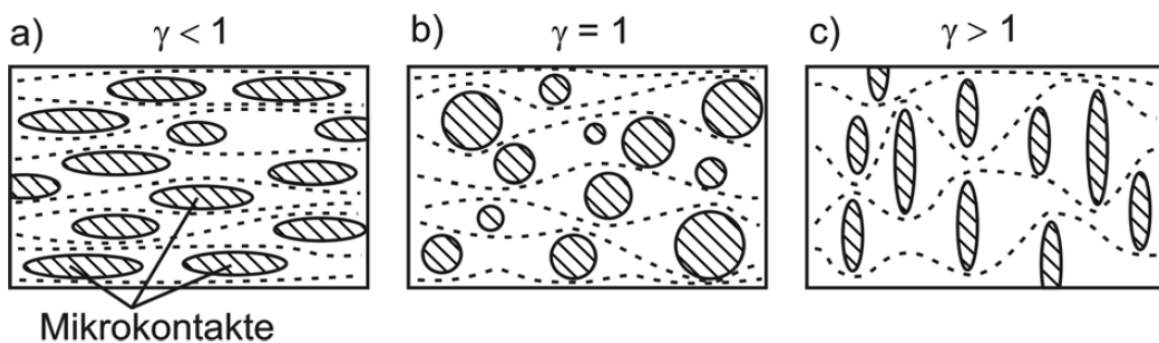


Abbildung 1: Peklinikfaktor bei verschiedenen Orientierungen der Oberflächenrauheiten

Je nach Ausrichtung der Rauigkeiten wird der Tragdruckaufbau erhöht ( $\gamma > 1$ ) oder vermindert ( $\gamma < 1$ ). Für den deterministischen Modellansatz muss eine ausreichend feine Auflösung der Oberfläche gewählt werden, um so die Rauheitsspitzen als 3D Modell auflösen zu können. Dies geht einher mit einer enormen Datenmenge und den dementsprechenden Anforderungen an die Rechentechnik. Aus diesem Grund wurde



dieser Ansatz erst wieder in den letzten 20 Jahren weiterverfolgt. Eingesetzt wird dieses Modell hauptsächlich für die Berechnung von geschmierten Punktkontakten. Das erste Modell für einen 3D-Linienkontakt gab es erst 2009 und wurde von REN ET AL. [11] entwickelt. Vergleiche haben gezeigt, dass die Vorhersage des Einflusses der Oberflächenstruktur und -orientierung auf die hydrodynamische Schmierfilmdicke mit dem deterministischen Modell ungenauer ist als mit dem Stochastischem Modellansatz. Der Trend in der Schmierfilmdicke ist bei bei dem Modell ähnlich, fällt aber bei dem deterministischen Modell schwächer aus. [12] Die Vor- und Nachteile beider Modelle sind nochmals in der nachfolgenden Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der Modellansätze

| Modellansatz    | Vorteile   | Nachteile   |
|-----------------|--|---|
| stochastisch    | geringe Datenmenge<br>geringere Anforderungen an die Rechentechnik<br>kurze Rechenzeiten                         | angenäherte Durchschnittswerte<br>keine Vorhersage lokaler minimaler/maximaler Schmierpalthöhen |
| deterministisch | exaktes 3D Modell der Oberfläche<br>sehr hohe Auflösung<br>exakte Vorhersage lokaler Maxima/Minima der Spalthöhe | enorme Datenmengen aufgrund der hohen Auflösung<br>lange Rechenzeiten                           |

## 2.3 Festkörperkontakt

Die in den Mischreibungsgebieten auftretenden Festkörperkontakte können über das stochastische Festkörperkontaktmodell nach GRENNWOOD und TRIPP von 1971 berücksichtigt werden. [13] Dieses rein elastische Kontaktmodell berücksichtigt den Zusammenhang des über die Oberfläche gemittelten Kontaktdruckes  $p_c$  und der nominellen Spaltweite  $h^*$ , welche mit der Standardabweichung entdimensioniert wird. Der Ansatz wurde schon mehrmals in der Literatur zusammengefasst und lässt sich mit Formel (3) und (4) beschreiben.[4]

$$\frac{A_c}{A} = \pi^2 (\eta_{GT} \beta_{GT} \sigma)^2 F2 \left( \frac{h^*}{\sigma} \right) \quad (4)$$

$$p_c = \frac{16\sqrt{2}}{15} \pi (\eta_{GT} \beta_{GT} \sigma)^2 \sqrt{\frac{\sigma}{\beta_{GT}}} E' F2,5 \left( \frac{h^*}{\sigma} \right) \quad (5)$$

Mithilfe eines mittleren Krümmungsradiuses  $\eta_{GT}$  und der mittleren Dichte  $\beta_{GT}$  der Rauheitsspitzen kann die reale Geometrie der Oberfläche beschrieben werden und der gemittelte Kontaktdruck  $p_c$  sowie der Kontaktflächenanteil  $A_c/A$  berechnet werden.

### 3 Simulations- und Berechnungstool SIRIUS

In diesem Teil der Arbeit erfolgt eine kurze Darstellung der im System SIRIUS realisierten Funktionalitäten, sowie der dort verwendeten theoretischen Grundlagen.

#### 3.1 Theoretische Grundlagen

Ausgangspunkt für die Simulation der hydrodynamisch und hydrostatisch wirkenden Gleitlager im System SIRIUS ist auch hier die Reynolds'sche Differentialgleichung (1) wie sie bereits betrachtet wurde.

Zum einen wurden in SIRIUS die Gümbel'schen Randbedingungen umgesetzt, welche die auftretenden Schmierfilmdrücke von  $p < 0$  durch  $p = 0$  ersetzen. Diese Randbedingungen verletzen das Gesetz der Masseerhaltung. Sie wurden trotzdem verwendet, da sie gegenüber den Sommerfeld'schen und Reynolds'schen Randbedingungen formal einfacher zu lösen sind. Die negativen Drücke im sich erweiternden Schmierspalt bilden die Kavitationserscheinungen ab und können alternativ in SIRIUS über die erweiterte Schmiertheorie nach WEGMANN [14] betrachtet werden. Es wird ein druckproportionaler Füllungsgrad  $F = (p/p+c)$  eingeführt, welcher berücksichtigt, dass der Schmierspalt mit einem Flüssigkeits-Gas-Gemisch gefüllt ist. Die erweiterte Reynolds'sche Differentialgleichung nach WEGMANN ergibt sich dann wie folgt (6):

$$0 = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{3}{h} \left( \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{12\eta}{h^3} \frac{p}{p+c} \left( \frac{uw}{2} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} \right) - \frac{12\eta}{h^2} \frac{c}{(p+c)^2} \left( \frac{uw}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (6)$$

Mit dieser ist es möglich, die auftretenden Kavitationserscheinungen bei der Simulation der hydrodynamisch und hydrostatisch wirkenden Gleitlager zu berücksichtigen. Für die Berechnung wird der Schmierpalt in die Ebene abgewickelt und in ein Gitternetz mit äquidistanter Schrittweite aufgeteilt. Für jeden Gitterpunkt wird die R-DGL aufgestellt und mit Hilfe des Finiten Differenzenverfahrens gelöst.

### 3.2 Funktionsumfang von SIRIUS

Die Erläuterung der in SIRIUS realisierten Funktionalitäten wird sich an dieser Stelle auf die, für die Definition der Schmierpaltgeometrie relevanten Funktionen beschränken. Grund dafür ist ihr entscheidender Einfluss auf die Berechnung der hydrodynamischen Vorgänge in Mischreibungsbereichen bei rauen Oberflächen. Die Definition der Spaltgeometrie in SIRIUS ist in Formel (7) dargestellt.

$$h(x, z, t) = h_0 + \Delta h_{Achse} + \Delta h_{Kant} + \Delta h_{Bieg} + \Delta h_{FormW} + \Delta h_{FormS} + \Delta h_{elast} \quad (7)$$

Ausgehend vom Lagerspiel  $h_0$  werden die Beträge verschiedener Komponenten berücksichtigt. So können Schmierpalthöhenänderungen aufgrund beliebiger achsparalleler Wellenverschiebungen ( $h_{Achse}$ ), wie sie im hydrodynamischen Betrieb entstehen aber auch Wellenbiegung ( $h_{Bieg}$ ) und Wellenverkantungen ( $h_{Kant}$ ) beispielsweise durch hohe einseitige Belastungen berücksichtigt werden. In der folgenden Abbildung 2 sind einmal die reine Verkantung  $k$  unter dem Winkel  $\gamma_k = X_{kant}$ , sowie die reine Biegung  $bi$  unter den Winkel  $\gamma_{bi} = X_{Bieg}$  in der Ebene der Biegelinie, bezogen auf das Koordinatensystem 1-2-3 dargestellt. Darüber hinaus können Formabweichungen von der ideal runden Form sowohl bei der Welle ( $h_{FormW}$ ) als auch bei der Lagerschale ( $h_{FormS}$ ) berücksichtigt werden.

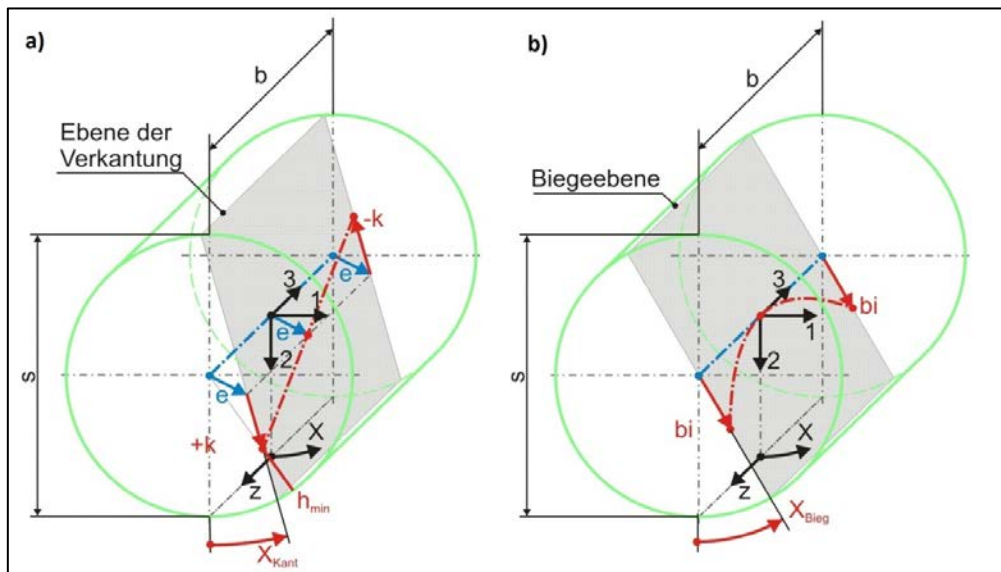


Abbildung 2 Definition der Wellenbiegung und Wellenverkantung

Des Weiteren kann in SIRIUS der Einfluss des Druckverlaufes auf die elastische Verformung der Lagerschale berücksichtigt werden. Allerdings ist dafür eine einmalige Berechnung der Steifigkeitsmatrix mit Hilfe eines FEM-Programmes notwendig. Diese kann dann über eine ASCII-Datei eingelesen werden. Die elastische Verformung der Lagerschale ( $h_{\text{elast}}$ ) aufgrund des hydrodynamischen Druckes fließt dann iterativ in die Berechnung mit ein. Für eine umfassendere und genauere Darstellung der einzelnen Funktionen kann auf frühere Arbeiten [1] zurückgegriffen werden.

#### 4 Ausblick Mischreibungsbetrachtung im System SIRIUS

Um das Simulationstool SIRIUS weiter zu verbessern, wird nun die Möglichkeit geschaffen, das Auftreten partieller Mischreibungsgebiete bei der Berechnung von hydrodynamisch wirkenden Gleitlagern zu beachten. Des Weiteren soll SIRIUS seinen Charakter als schnelles Auslegungstool beibehalten. Die kurzen Rechenzeiten auch bei komplexen Schmierspaltgeometrien resultieren aus der Anwendung des Finiten Differenzen Verfahrens. Um diesen Vorteil zu bewahren und da SIRIUS über keine direkte Kopplung an ein FEM Programm verfügt ist es sinnvoll den beschriebenen stochastischen Ansatz zu implementieren. Des Weiteren scheidet der deterministische Modellansatz aus, da in SIRIUS der Schmierspalt in einem Gitternetz mit äquidistanter Schrittweite diskretisiert wird und die Berechnung der R-DGL für jeden Gitterpunkt erfolgt. Um die Erfassung einer dreidimensionalen Oberflächenstruktur zu ermöglichen müsste die

Auflösung stark erhöht werden. Dies führt zu höherem Speicherbedarf und längeren Rechenzeiten. Darüber hinaus haben, wie bereits erwähnt, Vergleiche gezeigt, dass die Ergebnisse von deterministischen und stochastischen Modellen bei der Berechnung von Linienkontakten ähnlich ausfallen [12]. Die Ergebnisse der deterministischen Modell fallen quantitativ etwas geringer aus. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Umsetzung des stochastischen Modellansatzes, mit der Berücksichtigung von Oberflächenrauheiten nach PATIR und CHENG und Festkörperkontakten nach GREENWOOD und TRIPP, im Simulationstool SIRIUS die beste Lösung ist, um den Charakter als schnelles und genaues Auslegungstool zu erhalten.

## Literatur

- [1] S. Zorn and K. Brökel, "Hydrodynamisch und hydrostatisch wirkende Radialgleitlager in Schiffsantrieben - Erweiterte Simulationsansätze im System SIRIUS," in *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium*, 2013.
- [2] D. Dowson, "A generalized Reynolds equation for fluid-film lubrication," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 4, no. 2, pp. 159–170, Mar. 1962.
- [3] D. Bartel, *Simulation von Tribosystemen*. Wiesbaden: Vieweg Teubner Verlag, 2010.
- [4] G. Knoll, "Elasto-hydrodynamische Simulationstechnik mit integriertem Mischreibungskontakt," *Materwiss. Werksttech.*, vol. 34, no. 1011, pp. 946–952, Oct. 2003.
- [5] D. Bartel, L. Bobach, T. Illner, and L. Deters, "Simulating transient wear characteristics of journal bearings subjected to mixed friction," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, vol. 226, no. 12, pp. 1095–1108, Aug. 2012.
- [6] T. He, D. Zou, X. Lu, Y. Guo, Z. Wang, and W. Li, "Mixed-lubrication analysis of marine stern tube bearing considering bending deformation of stern shaft and cavitation," *Tribol. Int.*, vol. 73, pp. 108–116, May 2014.
- [7] G. Jacobs, R. Schelenz, and D. Witter, "Simulation hochbelasteter. langsam drehender Radialgleitlager im Mischreibungsbereich unter Berücksichtigung elastischer Verformung und Verschleiß," 2011.
- [8] P. H. Dawson, "Effect of Metallic Contact on the Pitting of Lubricated Rolling Surfaces," *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 4, no. 2, pp. 16–21, 1962.
- [9] N. Patir and N. U. Cheng, H. S. (Department of Mechanical Engineering, "An Average Flow model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication.pdf," *J. Lubr. Technol. - Trans. ASME*, vol. 100, pp. 12–17.
- [10] H. Czichos and K. Habig, "Tribologie-Handbuch," *Tribol. Tribometrie, ...*, 2010.
- [11] N. Ren, D. Zhu, W. W. Chen, Y. Liu, and Q. J. Wang, "A Three-Dimensional Deterministic Model for Rough Surface Line-Contact EHK Problems," *J. Tribol. Trans. ASME*, vol. 131, no. 1, 2008.

- [12] D. Zhu and Q. J. Wang, "Elastohydrodynamic Lubrication: A Gateway to Interfacial Mechanics - Review and Prospect," *J. Tribol. Trans. ASME*, vol. 133, no. 4, 2011.
- [13] J. A. Greenwood and J. H. Tripp, "The Contact of Two-Nominally Flat Rough Surfaces," *Proc. Inst. Mech. Eng.*, vol. 185, no. 1, pp. 625–633, 1970.
- [14] R. Wegmann, "Erweiterung der hydrodynamischen Schmiertheorie durch Einbeziehung des Unterdruckgebietes in die Berechnung instationär belasteter Gleitlager," Universität Rostock, 1978.

# FEM-Optimierung der Spannungskonzentrationen durch Entlastungskerb an Sicherungsringnuten bei Zahnwellen

Ali Daryusi, Christian Benz

Professur für Maschinenelemente und CAD/CAE-Labor, Hochschule Offenburg

Badstraße 24, 77652 Offenburg

E-Mail: ali.daryusi@hs-offenburg.de; cbenz@stud.hs-offenburg.de;

Internet: <http://www.hs-offenburg.de/cax/>

**Inhalt:** Die bisherigen Forschungen [1] im Bereich der Entlastungen von den örtlichen Spannungskonzentrationen in den Sicherungsringnuten beschränken sich auf glatte Vollwellen. Über die Abschwächung der Kerbwirkung von Sicherungsringnuten bei Zahn- und Keilwellen lagen bisher keine systematischen Untersuchungen und keine ausreichend gesicherten Ergebnisse vor. Deshalb wurden Untersuchungen zur Ermittlung der entlastenden Wirkung der Spannungsformzahlen von SR-Nuten bei Zahnwellen durchgeführt. Diese erfolgen mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) für die Belastungsarten Zug/Druck, Biegung und Torsion. Eine Formzahlreduktion von ca. 35% in der SR-Nut konnte bei Biegung und Zug/Druck realisiert werden. Bei Torsion beträgt diese ca. 30 % nach der NSH bzw. 12% nach der GEH gegenüber der originalen Kerbgeometrie ohne Entlastungsnuten. Die gewonnenen Ergebnisse erweitern die qualitativen und quantitativen Erkenntnisse über die Entlastung von der mehrfachen Kerbwirkung.

**Abstract:** The previous research [1] in the field of the reduction of local stress concentrations in the grooves of the retaining rings for shafts (circlip) limited to solid shafts. On the reduction of the notch effect of circlip-grooves in the involute splines shafts were so far not been systematically evaluated and not sufficiently secured results. Studies were conducted to determine the effect of relieving stress concentration factors of of circlip-grooves at the Involute splines. These are made using the finite element method (FEM) for the types of loads tension/compression, bending and torsion. A reduction of the stress concentration factors to about 35% in the groove could be realized by bending and tension/compression. The reduction amounts to about 30% by torsion after the Maximum-Normal-Stress and 12% after the von Mises Criterion, compared to the original notch geometry without relief grooves. The results obtained extend the qualitative and quantitative findings regarding mitigating the stress concentrations due to multiple notches.

**Stichwörter:** Entlastungskerb, Formzahlen, FEM-Optimierung, Sicherungsringnuten, Zahnwellen.

**Keywords:** relief notches, stress concentration factors, FEM-optimization, circlip grooves, involute splines.

## 1 Ausgangssituation

Der Sicherungsring ist ein im Maschinenbau unentbehrliches Konstruktionselement. Er wird häufig zum Fixieren von Maschinenelementen (z.B. Zahnrad, Riemenscheibe, usw.) auf zylindrischen Wellen sowie Zahn- und Keilwellen für die Aufnahme von hohen Axialkräften verwendet. Formschlüssige Sicherungsringverbindungen lassen sich einfach montieren und fertigen.

Für die Montage und Festlegung mit Sicherungsring auf Zahnwellen nach DIN 5480-2 [2] sind umlaufende scharfkantige Rechtecknuten nach DIN 471 [3] notwendig. Diese stellen aber für die Wellendauerfestigkeit eine nicht zu unterschätzende Bruchgefahr dar. Von diesen kritischen Stellen (Nut- und Zahnfußradius) gehen Anrisse aus, die zum Versagen der Welle infolge Ermüdungsbrüche bei schwingender Beanspruchung führen, [4].

Bei der Dauerfestigkeitsauslegung muss auf diese gefährdeten Wellenbereiche besonders Augenmerk gelegt werden. Die gefährlichen Spannungsanhäufungen infolge der Kerbkombination (Zahnwelle/SR-Nut) können durch Anbringen von kraftflussgerechten Entlastungskerb vor und hinter der Hauptkerbe (SR-Nut) abgeschwächt werden. Dabei spielen die geometrische Position, Form und die Abmessungen dieser zusätzlichen Nuten eine entscheidende Rolle.

## 2 Zielsetzung und Lösungsweg

Die Bereitstellung der Kerbformzahlen und ihrer prozentualen Verringerung in Abhängigkeit von den geometrischen Parametern der Zahnwelle, der SR-Nut und ihrer Gestaltungsausführungen sowie der Form und Lage der Entlastungskerbe stellen dabei das zentrale Thema in diesem vorliegenden Beitrag dar.

Zunächst wird der Einfluss der unterschiedlichen Gestaltungsvarianten der nach DIN 471 genormten Wellennuten auf die Formzahlen mit der FEM analysiert. In dieser Norm sind vier Ausführungsmöglichkeiten von SR-Nuten vorgesehen. Diese ist in der Abb. 1 dargestellt. Die gewonnenen Erkenntnisse an den genormten Nutformen werden mit denen an einer nicht genormten Nutform (e) verglichen. Bei dieser Nut ist der kreisbogenförmige Kerbgrund mit dem Radius  $R_E$  und mit den genormten Eckradien ausgeführt. Die Eckradien verbinden in tangentialer Weise die Nutwand mit dem Kreisbogen. Die Größe der übrigen Nutparameter richten sich nach der genormten Ausführung (a) aus, (Abb. 1).



| Nutform (a)   | Nutform (b)                                       | Nutform (c)                                  | Nutform (d)  | Nutform (e)   |
|---|---|--|--|---|
| Ausführungsmöglichkeiten der Sicherungsringnuten nach DIN 471 |   |  |  | nicht genormte Nut                                  |
| Rechtecknut<br>vertik. Nutwand<br>$r_A$ DIN 471               | konische<br>Nutwand von $15^\circ$<br>$r_B = r_A$ | schräger<br>Kerbgrund<br>$r_C = 2 \cdot r_A$ | kombinierte Form<br>aus (b) und (c)<br>$r_D = 3 \cdot r_A$ | kreisbogenförmiger<br>Kerbgrund<br>$r_E = r_A, R_E$ |

Abbildung 1: Schematische Darstellung der untersuchten SR-Nutformen, (Quelle: eigene Darstellung)

Anschließend wird die Kerbwirkung an der Nutform (a) mit Hilfe von Entlastungsnuten optimiert. Dabei wurden zwei unterschiedliche Entlastungsnutgeometrien in Anlehnung an [5] betrachtet, Abb. 2. Die Hauptkerbe wird mit „HK“, die Entlastungskerbe mit „EK“ abgekürzt. Die Auswahl der untersuchten Geometrien der Zahnwellen orientiert sich nach DIN 5480. Die dazu passenden SR-Nuten wurden aus der Norm DIN 471 entnommen, Tab. 1.

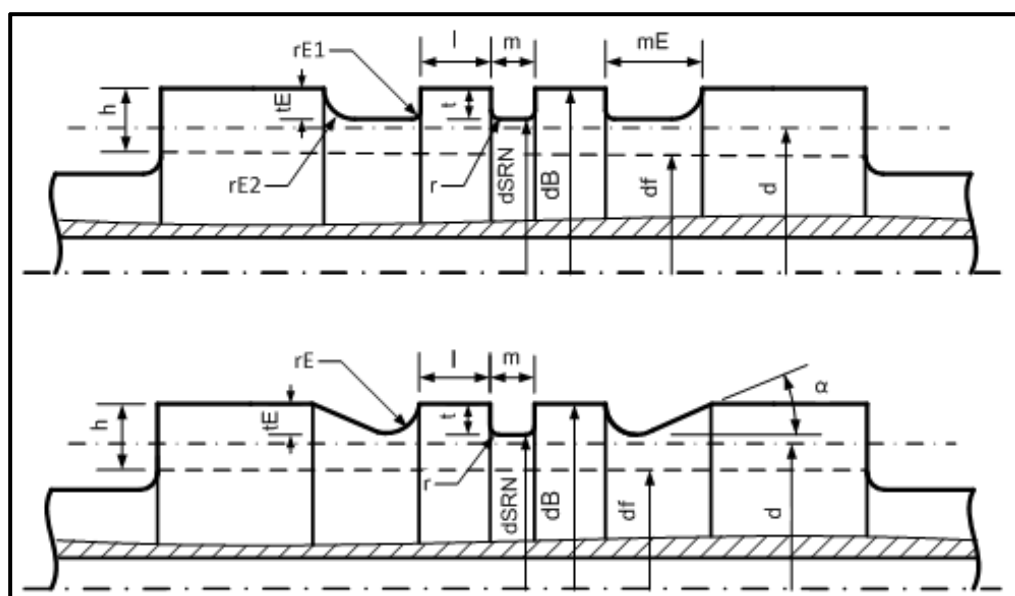


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der untersuchten Zahnwellen mit SR-Nuten und zwei zur Hauptnut symmetrisch angebrachten umlaufenden Entlastungskerven, oben: Entlastungskerbe Typ A und unten: Entlastungskerbe Typ B (Quelle: eigene Darstellung)

Tabelle 1: Übersicht der geometrischen Abmessungen der untersuchten Zahnwellen nach DIN 5480-2 [2] mit SR-Nuten nach DIN 471 [3] (die Nutabmessungen gelten für die Nutform a)

| Modellbezeichnung        |                     | Nuttiefe  | Nutbreite | Nutradius |
|--------------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| Zahnwellen dB x m x z    | SR-Nuten            | $t_{SRN}$ | $m_{SRN}$ | $r_{SRN}$ |
| DIN 5480 - W15 x 2 x 6   | DIN 471 - 15 x 1    | 0,35      | 1,1       | 0,1       |
| DIN 5480 - W25 x 2 x 11  | DIN 471 - 25 x 1,2  | 0,55      | 1,3       | 0,12      |
| DIN 5480 - W40 x 2 x 18  | DIN 471 - 40 x 1,75 | 1,25      | 1,85      | 0,175     |
| DIN 5480 - W60 x 2 x 28  | DIN 471 - 60 x 2    | 1,5       | 2,15      | 0,2       |
| DIN 5480 - W100 x 2 x 48 | DIN 471 - 100 x 3   | 1,75      | 3,15      | 0,3       |
| DIN 5480 - W150 x 2 x 74 | DIN 471 - 150 x 4   | 2,5       | 4,15      | 0,4       |

### 3 Vorbemerkungen zur Ergebnisauswertung

Die numerischen Untersuchungen zur entlastenden Wirkung wurden mit der Software PTC Simulate 2.0 durchgeführt, [6]. Die Kerbspannungsanalyse erfolgt für die Belastungsarten Zug/Druck, Biegung und Torsion.

Um eine Einschätzung der Genauigkeit der mit dieser Software gewonnenen Ergebnisse zu ermöglichen, wurden Konvergenzuntersuchungen durchgeführt. Dabei wurden die FE-Ergebnisse an SR-Nuten in Vollwellen mit den berechneten Formzahlen nach den Näherungen von [5] verglichen. Diese Untersuchung ergab eine gute Übereinstimmung.

Die Maximalwerte der Kerbspannungen bzw. der Formzahlen werden je nach vorhandenen Materialeigenschaften (spröde bzw. duktil) getrennt nach der Hauptnormalspannungshypothese (NSH) und Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH) ausgewertet. Die Verwendung der größten Hauptspannung  $\sigma_1$  nach der NSH wird aber favorisiert, [4].

Für die einfache Verarbeitung durch den Konstrukteur sind die Nennspannungen zur Formzahlberechnung und -darstellung in diesem Beitrag auf den Nutgrunddurchmesser  $d_{SRN}$  für die SR-Nutform (a) bezogen.

Die Suche nach dem Optimum geschieht durch die Variation jeweils eines Parameters bei sonst konstanten Größen. Die mit Entlastungskerten erzielte prozentuale Verringerung der Formzahlen an der Hauptkerbe (SR-Nut) wird zur Beurteilung der Wirkung von Entlastungskerten verwendet. Sie lässt sich mit der Beziehung (1) beschreiben, wobei  $\alpha_{\sigma,\tau,oEK}$  die Formzahl ohne Entlastungskerbe und  $\alpha_{\sigma,\tau,mEK}$  die Formzahl mit Entlastungskerbe bedeuten. Die Ergebnisse werden als Diagramme und Gestaltungshinweise angegeben.

$$Et_{\alpha,\sigma,\tau} = \frac{\alpha_{\sigma,\tau,oEK} - \alpha_{\sigma,\tau,mEK}}{\alpha_{\sigma,\tau,oEK}} \cdot 100\% \quad (1)$$

## 4 Numerische Untersuchungsergebnisse

### 4.1 Formzahlvergleich der SR-Nutformen

In der Abb. 3 sind die Formzahlverläufe der untersuchten Gestaltungsvarianten der SR-Nuten nach der NSH bei Zug/Druck, Biegung und Torsion als Funktion vom Bezugsdurchmesserverhältnis  $d_B/m$  aufgetragen.

Aus der Analyse der FEM-Ergebnisse bei Zug- oder Biegebelastung Abb. 3-a und 3-b ergibt sich, dass die nichtgenormte Nutform (e) deutlich kerbmindernder als die übrigen Nutvarianten ist, gefolgt von der Form (c). Die Formzahlwerte Infolge der Ausführung (e) bzw. (c) sind bis zu 38% bzw. 16% kleiner als die Werte der Nutform (a). Die Nutausführung (d) stellt sich wegen des geschwächten Kerbgrundquerschnitts als die ungünstigste Variante dar, d.h. sie liefert die größten Formzahlwerte, im Durchschnitt um 14% größer als bei der Ausführung (a). Die aus den Nutformen (a) und (b) resultierenden Formzahlverläufe fallen zusammen. Die Formzahlkurven verlaufen ab dem Verhältnis  $d_B/m > 30$  nahezu konstant. Bei kleinen Verhältnissen  $d_B/m < 20$  sind höhere Formzahlen bei allen Ausführungen festzustellen. Es fällt auf, dass die Biegeformzahlen bei diesem Verhältnis relativ höhere Werte erreichen als die Zugformzahlen. Der Grund liegt in der Betrachtung der Nenn-Querschnittsfläche. Die maximalen Spannungsspitzen bei Zug/Druck oder Biegung treten ausschließlich im Nutradius auf, dies gilt auch für alle untersuchten Geometrieausführungen. Im Zahnfußbereich sind keine Überhöhungen festzustellen. Durch den kreisbogenförmigen Kerbgrund der Nutform (e) verlagert sich die maximale Spannung in die Mitte der Nut.

Bei Torsionsbelastung konnten die geringsten Formzahlen durch die Variante (c) erreicht werden. An dieser Stelle sei zu erwähnen, dass die erzielte Formzahlverminderung wie bei Zug oder Biegung möglicherweise auf Grund der Ausführung mit einem größeren Radius  $r_C=2r_A$  zustande kam. Die in der Abb. 3-c gekennzeichneten Spannungsüberhöhungen bei der Nutformen (d) und (e) sind durch die Kerbüberlagerung infolge des Zusammentreffens des SR-Nutradius mit dem Fußradius zu erklären. Es handelt sich dabei um eine Durchdringungskerbe. Bei Torsion treten die größten Spannungsüberhöhungen nicht nur in der SR-Nut auf, sondern sind diese deutlich im Zahnfußbereich zu beobachten, solange sich der Nutradius mit dem Fußradius nicht überschneidet, [1].

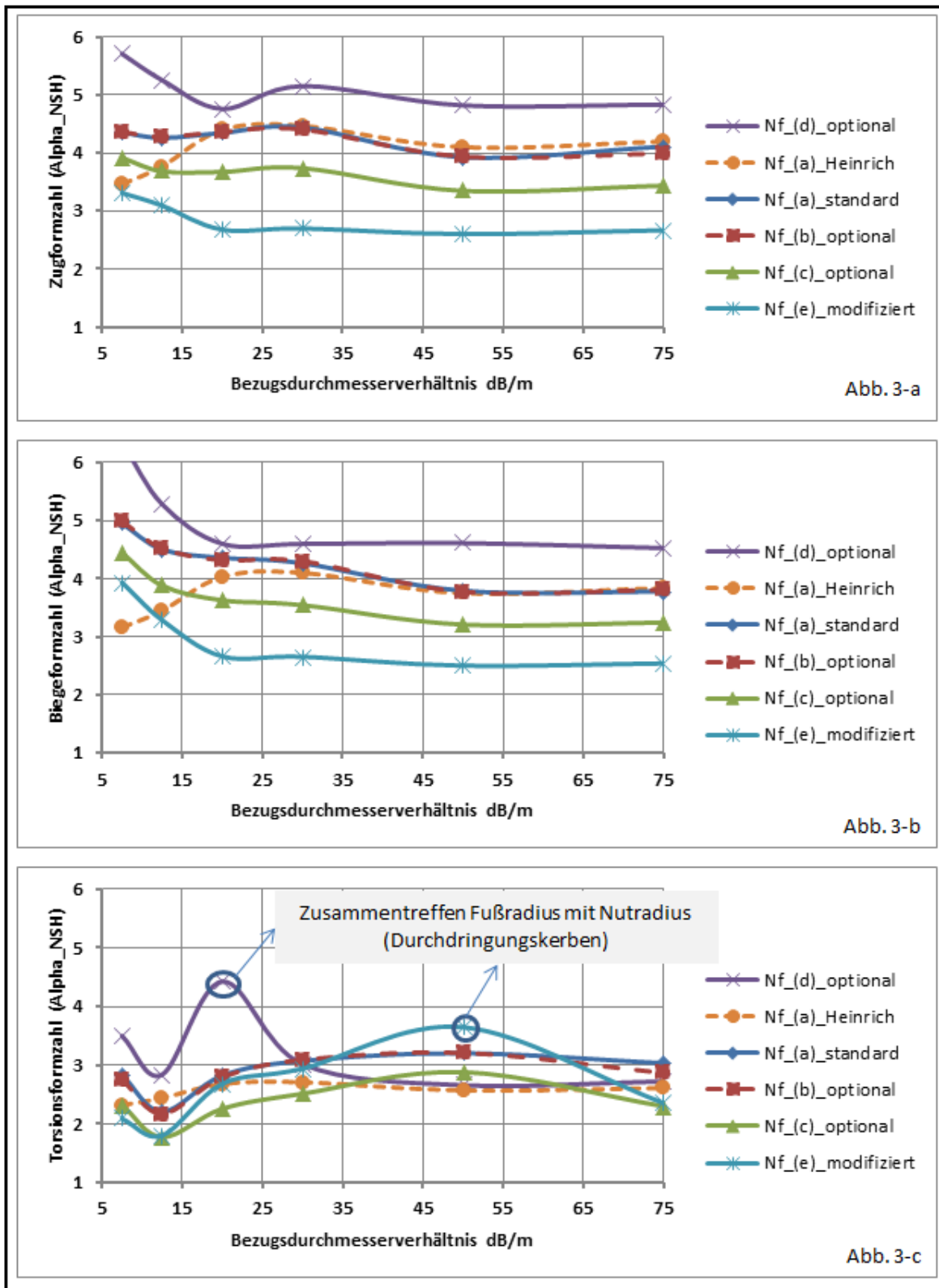


Abbildung 3: Darstellung der mit FEM ermittelten Formzahlen nach der NSH an fünf Gestaltungsvarianten (siehe Abb. 1) für die Nutform eines Sicherungsringes im Vergleich zum Formzahlverlauf nach Heinrich [5], bei Zug/Druck, Biegung und Torsion, aufgetragen über das Bezugsdurchmesser Verhältnis  $d_B/m$

## 4.2 Beurteilung der Wirkung von Entlastungskerb

In der Abb. 4 sind exemplarisch die Formzahlverläufe der untersuchten Geometrien der Zahnwellen mit SR-Nuten und mit gegenüberliegenden symmetrischen Entlastungskerb (Typen A und B) im Vergleich zur originalen Geometrie (ohne Entlastungskerb) bei Zug/Druck und Torsion als Funktion vom Verhältnis  $d_B/m$  aufgetragen. Für die Einschätzung der Qualität der berechneten Formzahlen in der Nut/Zahnwelle wurden die Formzahlen an glatten Wellen mit Nuten nach [5] zum Vergleich herangezogen.

Eine Anordnung von Haupt- und Entlastungskerb gilt dann als optimiert, wenn die größte Kerbspannung an der Entlastungskerbe derjenigen an der Hauptkerbe entspricht.

Die Ergebnisanalyse bei der Zugbelastung ergab in einem großen Bereich des untersuchten Spektrums ( $d_B/m > 20$ ) eine überraschend gute Übereinstimmung zwischen den Verläufen der Formzahlen in der SR-Nut an Zahnwellen und in der SR-Nut an glatten Wellen nach [5]. Das Spannungsverhalten weicht nur lokal im Bereich kleiner Zähnezahlen bzw. bei einem Verhältnis von  $d_B/m \leq 20$  ab.

Die Zug- bzw. Biegeformzahlen nach der GEH lassen sich mit dem Zusammenhang  $\alpha_{\sigma,zd,b\_GEH} \approx (0,90 \dots 0,92) \cdot \alpha_{\sigma,zd,b\_NSH}$  beschreiben.

Die realisierten prozentualen Entlastungen der Formzahlen  $Et_{\alpha_{zd,b}}$  in der SR-Nut bei Zug/Druck oder Biegung beträgt ca. 35% gegenüber der originalen Kerbgeometrie ohne Entlastungsnuten. Dies gilt für beide Entlastungsgeometrien (Typen A und B) und nach beiden Spannungshypothesen (NSH und GEH), [1].

Bei Torsion stellt man fest, dass die ermittelten Torsionsformzahlen für die Kerbkombination (SR-Nuten an Zahnwellen) über denen für SR-Nuten bei glatten Wellen liegen. Die Wirkung der Entlastungsnuten unterscheidet sich je nach der untersuchten Variante Typ A oder Typ B. Die Geometrie Typ B zeigt einen besseren formzahlmindernden Effekt.

Näherungsweise lässt sich diese Beziehung zwischen den Formzahlen nach der GEH und der NSH mit  $\alpha_{\tau,t\_GEH} \approx (0,58 \dots 0,75) \cdot \alpha_{\tau,t\_NSH}$  beschreiben.

Die erzielte Entlastung der Torsionsformzahlen  $Et_{\alpha_t}$  in der SR-Nut beträgt ca. 30 % nach der NSH bzw. 12% nach der GEH für beide Entlastungskerb gegenüber der originalen Kerbgeometrie ohne Entlastungsnuten.

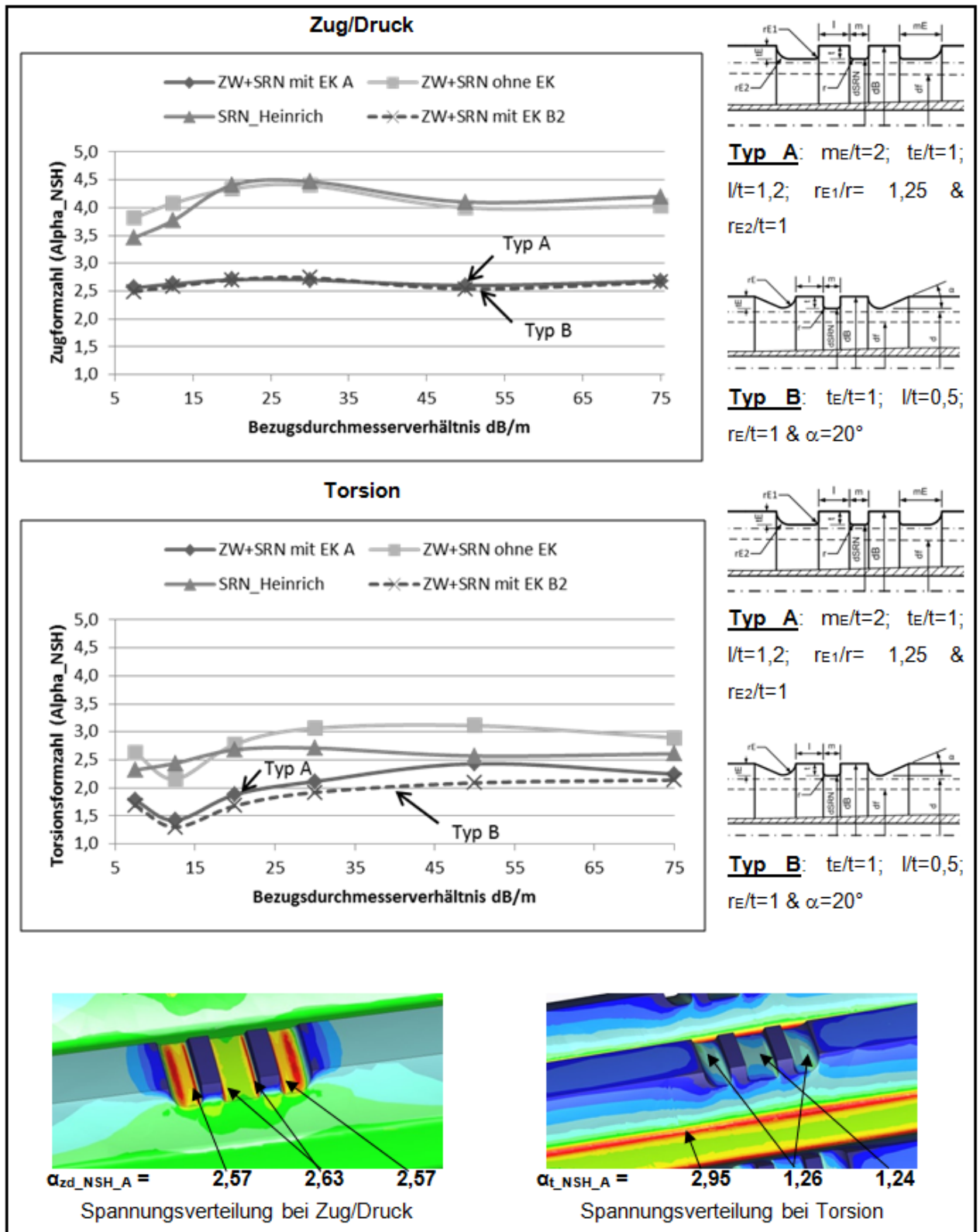


Abbildung 4: Darstellung der FEM-Formzahlverläufe bei Zug/Druck (oben) und Torsion (unten) an SR-Nuten auf Zahnwellen mit und ohne Entlastungsnuten im Vergleich zu Formzahlen an Nuten auf glatten Wellen nach [5], (Quelle: eigene Darstellung)

## 5 Zusammenfassung

Ogleich die Kenntnis der festigkeitserhöhenden Einflüsse der Profilwellen infolge der Entlastungskerbten für den Konstrukteur von großer Bedeutung ist, lagen bisher über Abschwächung der Kerbwirkung von Profilwellen mit SR-Nuten keine systematischen Untersuchungen und keine ausreichend anwendungsbereiten Ergebnisse vor.

Es wurden Reihenuntersuchungen an räumlichen FEM-Modellen der Zahnwellen mit SR-Nuten und mit Entlastungskerbten für verschiedene Belastungsarten durchgeführt. Ziel war es, die entlastende Wirkung der Spannungsformzahlen in den SR-Nuten zu bestimmen. Eine Formzahlreduktion von ca. 35% in der SR-Nut konnte bei Biegung und Zug/Druck realisiert werden. Bei Torsionsbelastung beträgt die erzielte Entlastung von Formzahlen in der SR-Nut ca. 30 % nach der NSH bzw. 12% nach der GEH gegenüber der originalen Kerbgeometrie ohne Entlastungsnuten.

Die im Rahmen dieser Veröffentlichung vorliegenden Ergebnisse erweitern die qualitativen und quantitativen Erkenntnisse über die Entlastung der mehrfachen Kerbwirkung.

Die optimale Gestaltung einer Entlastungskerbe ist nicht nur von ihrer Lage, Form und den Abmessungen bezüglich der Hauptkerbe abhängig, sondern auch von der Belastungsart der Welle und von der verwendeten Spannungsauswertungshypothese.

Der merkliche Abfall der Kerbspannung infolge von Entlastungsnuten soll dem Konstrukteur einen Anlass geben, diese häufiger anzuwenden. Durch gegebenenfalls optimierte Dimensionierung der Profilwellen können insbesondere kleinere Industriebetriebe Kosten und Bauteilgewicht sparen.

## 6 Ausblick

Die in diesem Beitrag gewonnenen Erkenntnisse können als Grundlage für weitere Untersuchungen im Bereich der Entlastung von SR-Nuten verwendet werden. Ob diese erreichten Entlastungswerte auch für die Profilwellenverbindungen (mit Vorhandensein einer Nabe) und für andere Profilwellen (Keil- und Kerbzahnwellen) mit SR-Nuten unverändert gelten, müssen ergänzende Untersuchungen noch zeigen.

In dieser Veröffentlichung wurden nur Zahnwellen mit dem Verhältnis  $\rho_{f-min}/m = 0,16$  und einem konstanten Modul  $m=2$  mm betrachtet. Um verlässliche Aussagen über den generellen Spannungsformzahlverlauf und die Maximalwerte der Vergleichsspannung im

Zahnfußbereich bei Torsionsbeanspruchung im Zusammenhang mit der Entlastung von SR-Nuten zu erhalten, sind weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Geometrieparametern (z.B. Modul  $m$ , Nutradius  $r$ , Zähnezahl  $z$ ) zur Entlastungswirkung von SR-Nuten in Kombination mit der Entlastung des Zahnfußbereichs durch die Vergrößerung des Fußrundungsradius z.B.  $\rho_{f-min}/m = 0,30; 0,45$  und  $0,55$  bis zur Fußvollausrundung durchzuführen. Die hierdurch zu erzielenden Resultate werden dann in den künftigen Veröffentlichungen zur Verfügung gestellt.

Zur Bestätigung der numerischen Ergebnisse und zur Optimierung der Entlastungsnuten und ihrer Wirkung für dynamisch belastete Wellen muss allerdings auch die Kerbempfindlichkeit des Werkstoffs durch die Realisierung von Dauerversuchen berücksichtigt werden.

## 7 Literatur

- [1] Daryusi, Ali; Benz, Christian: *FEM-Untersuchung zur Milderung von Kerbwirkungen durch Entlastungskerb in Zahnwellen mit Sicherungsringnuten*. SMK 2014 „Schweizer Maschinenelemente Kolloquium 25. und 26. November 2014“. Herausgegeben von KISSsoft AG.
- [2] DIN 5480-2: *Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser*. Berlin, Beuth Verlag, 2012
- [3] DIN 471: *Sicherungsringe (Halteringe) für Wellen – Regelausführung und schwere Ausführung*. Berlin, Beuth Verlag, 04/2011
- [4] Daryusi, Ali: *FEM-Untersuchungen zur Überlagerung von konstruktiven Mehrfachkerben beim Zusammentreffen von Evolventenzahnwellen mit Sicherungsringnuten*. 5. VDI-Fachtagung für Welle-Nabe-Verbindungen in Nürtingen bei Stuttgart, 25. und 26.09.2012, VDI-Berichte 2176, VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf 2012
- [5] Heinrich, Johannes: *Kerbwirkung an Sicherungsringnuten und Berechnung von Sicherungsringverbindungen*. Dissertation der TU Darmstadt, 1984.
- [6] Parametric Technology Corporation: *Creo Parametric 2,0 Simulate*. 2012



# Systematisches Testen von numerischen Berechnungswerkzeugen

Joachim Langenbach, Nadine Nagler, Norbert Müller, Armin Lohrengel

Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal

Robert-Koch-Str. 32, 38678 Clausthal-Zellerfeld

E-Mail: [langenbach@imw.tu-clausthal.de](mailto:langenbach@imw.tu-clausthal.de); Internet: <http://www.imw.tu-clausthal.de/de>

**Inhalt:** *In Berechnungssoftware integrierte numerische Berechnungsmodelle stellen erhöhte Anforderungen an die Validierung des zugrundeliegenden Modells. Zum einen ist die Unkenntnis des späteren Anwenders zu berücksichtigen, zum anderen ist sicherzustellen, dass das Modell innerhalb der Einsatzgrenzen verlässliche Ergebnisse liefert. Hierzu erfolgt mit Hilfe des Continuous Integration Konzeptes aus der Softwareentwicklung ein Lösungsvorschlag.*

**Abstract:** *Numerical based simulation models, integrated in simulation software, lead to grate demands on the validation of the underlying simulation model. Thereby, on the one hand the user's abilities has to be considered. On the other hand it has to be ensured that the simulation model's results are reliable within the investigated limits. In order to achieve these goals, a solution, suggested here, consists of the Continuous Integration Concept which is widely-used in the software development.*

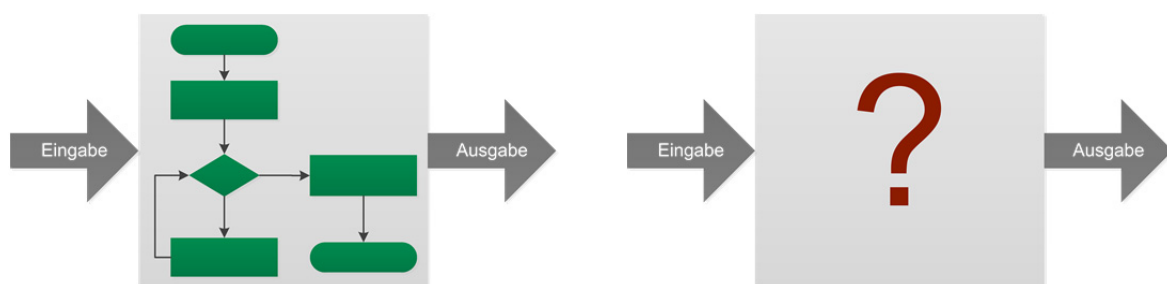
**Stichwörter:** *Validierung, Test, numerische Berechnungsmodelle, Werkzeuge, Entwicklungsmethodik, Continuous Integration, Unit Testing*

**Keywords:** *Validation, Testing, numerical simulation models, tools, design methodology, Unit Testing, Continuous integration*

## 1 Einleitung

Die Anwendung numerischer Berechnungsverfahren stellt innerhalb des Produktentwicklungsprozesses eine feste Größe dar. Etabliert sind hier Festigkeitsberechnungen mittels der Finiten Elemente Methode (FEM) sowie Mehrkörpersimulationen (MKS). Aktuell erstellt der Berechnungsingenieur dabei zumeist das Modell zur numerischen Simulation und führt anschließend die Berechnung selbst durch. Das bedeutet, dass der Modellanwender über detaillierte Kenntnisse über das Simulationsmodell verfügt, da er es selbst erstellt hat. Somit fällt es dem Berechnungsingenieur leicht, das Verhalten des Modelles bei der Berechnung zu interpretieren und auch die Ergebnisse einzuschätzen. Zunehmend ist jedoch zu beobachten, dass numerische Berechnungsmodelle in Berechnungswerkzeuge eingebettet werden und durch Dritte Anwendung finden. Hierbei ist es unerheblich,

ob die Anwender firmeninterne oder externe Kunden sind. Entscheidend ist, dass der Anwender in diesem Fall nicht mehr über detaillierte Kenntnisse des zugrundeliegenden Simulationsmodells verfügt. Im Prinzip stellt das Simulationsmodell für ihn damit eine Black-Box dar (s. Abbildung 1), in die er Daten eingibt und ein Ergebnis erhält. Die Vorgänge innerhalb des Berechnungswerkzeuges bleiben dem Anwender verborgen. Damit kann der Anwender das Verhalten des Modells und die Ergebnisse deutlich schlechter interpretieren. In den meisten Fällen kann er lediglich die Eingaben überprüfen und muss sich anschließend darauf verlassen, dass das Ergebnis stimmt. Die Benutzerfreundlichkeit dieser Berechnungswerkzeuge führt ferner dazu, dass der Anwender kein Wissen über die zugrunde liegenden numerischen Simulationsmethoden haben muss. Dies erschwert ihm die Interpretation der Ergebnisse jedoch zusätzlich. Ist hingegen gar nicht bekannt, auf welchen numerischen Grundlagen ein Berechnungswerkzeug aufbaut, ist der Anwender, mit oder ohne Fachwissen im Simulationsbereich, nicht mehr in der Lage, die Plausibilität und Güte der Ergebnisse einzuschätzen. Insgesamt führen diese Entwicklungen, unabhängig ihrer Erhältlichkeit auf dem freien Markt, zu einer erhöhten Verantwortung der Anbieter der Berechnungswerkzeuge. Schlussendlich steht der Entwickler damit vor einer neuen Herausforderung, denn er muss die Simulationsmodelle nicht nur erstellen, sondern auch deren Einsatztauglichkeit systematisch testen. Als Lösungsansatz für dieses Problem wurde das Prinzip des Continuous Integration (CI) aus der Softwareentwicklung auf die Entwicklung von Berechnungswerkzeugen mit numerischen Modellen übertragen.



**a: dieselbe Person sind**

**b: verschiedene Personen sind**

Abbildung 1: Numerische Berechnungswerkzeuge aus Sicht des Anwenders, wenn der Entwickler und der Anwender

Ein FVA Forschungsvorhaben des Institutes für Maschinenwesen kann hier als Beispiel dienen. Innerhalb des FVA Forschungsvorhabens 563 I, „Axiale Belastbarkeit der Freiläufe“ [1] ist eine Vorschrift zur Beurteilung der Ausfallwahrscheinlichkeit von Freiläu-

fen anhand der späteren Betriebsbedingungen (u. a. Torsionsmomente, Axiallasten, Geometrie) zu ermitteln. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen darin in eine Berechnungsvorschrift überführt werden. Aufgrund der komplexen Vorschrift erfolgt die Implementierung der Berechnungsvorschrift in einem Berechnungswerkzeug, welches eine FE- und eine MKS-Berechnung koppelt (s. Abbildung 2). Die Validierung der Berechnungsvorschrift erfolgt dabei üblicherweise durch Prüfstandsversuche. Mit Hilfe der Versuche ist demnach sichergestellt, dass die Berechnungsvorschrift die Realität abbildet. Ob das Berechnungswerkzeug jedoch die Berechnungsvorschrift korrekt implementiert, ist damit nicht gesichert. Um diese Verifikation zu erbringen findet der Ansatz des Continuous Integration Anwendung auf numerische Berechnungsmodelle.

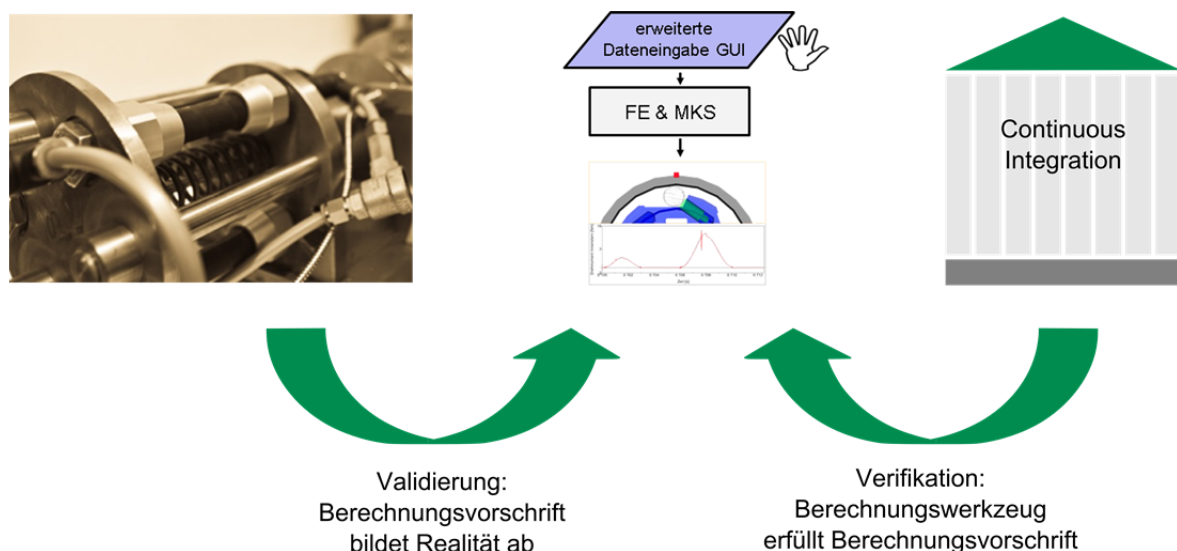


Abbildung 2: Validierung und Verifikation eines automatisierten Berechnungsablaufes zur Freilaufdimensionierung mittels gekoppelter FE- und MKS-Berechnung

## 2 Continuous Integration – Eine Einführung

Das Konzept des CI besitzt als grundlegendes Ziel, jede Zeile Programmcode unter möglichst realitätsnahen und reproduzierbaren Bedingungen zu testen. In Anlehnung an [2] besteht das Konzept hierzu aus den in Abbildung 3 dargestellten Säulen. Die Basis für alle Maßnahmen bildet eine gemeinsame Codebasis. Dabei arbeiten alle Entwickler zwar mit einer lokalen Arbeitskopie des Quellcodes, pflegen jedoch die abgeschlossenen Änderungen in die gemeinsame Codebasis ein. Dies geschieht allerdings erst dann, wenn auch Tests für die geänderten Bestandteile vorliegen (1. Säule). Sobald die Tests vorhanden sind, erfolgt die Integration des geänderten Quellcodes in die gemeinsame Codebasis (2.

Säule). Daraufhin werden die geänderten Teile übersetzt (Build-Vorgang, 3. Säule) und die Tests ausgeführt. Die geforderte, häufige Integration setzt allerdings eine kurze Laufzeit der ausgeführten Tests voraus (4. Säule). Damit die Tests schließlich unter realistischen Bedingungen ablaufen, ist ein Testsystem anzustreben, welches dem System des Anwenders stark ähnelt (5. Säule). Eine weitere Forderung besteht im einfachen Zugriff (6. Säule) auf die Ergebnisse des Build-Vorganges sowie der Tests, damit alle interessierten Kreise Informationen erhalten können. Ebenfalls von großem Interesse ist ein gutes Berichtswesen, da nur so die Fehlerquellen identifiziert und Änderungen nachvollzogen werden können. Auch Qualitätskenngrößen lassen sich so ablesen und damit auch der Reifegrad der Software ermitteln (6. Säule). Dies ist zum Beispiel für eine automatische Verteilung (7. Säule) wichtig, da nur Software mit entsprechender Qualität freigegeben werden darf.

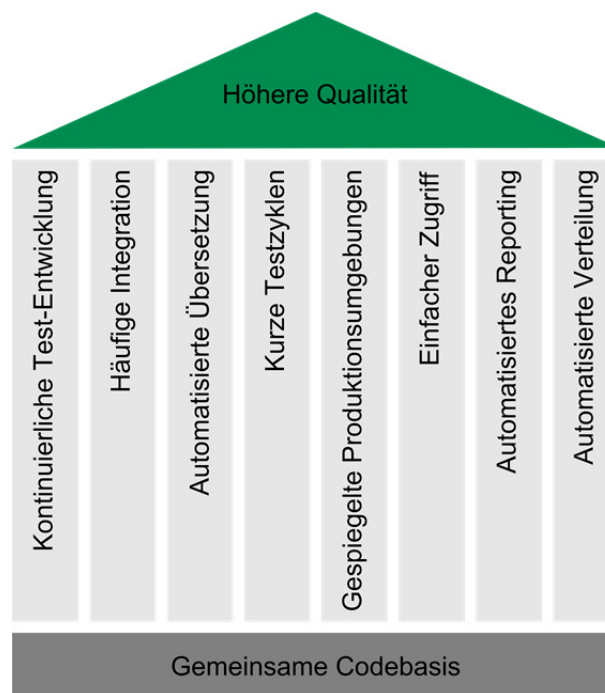


Abbildung 3: Prinzipien des Continuous Integration in Anlehnung an [1]

### 3 Continuous Integration numerischer Berechnungsmodelle

Bei der Anwendung des CI Konzeptes auf numerische Berechnungsmodelle sind verschiedene Besonderheiten numerischer Methoden zu berücksichtigen (s. Abbildung 4). Die gravierendste Herausforderung stellt die Rechenzeit dar. Numerische Berechnungen benötigen oft viel Zeit. Das Ziel der kurzen Testzyklen ist daher bedeutend schwerer zu

erreichen, als bei der Softwareentwicklung. Kurze Testzyklen sind aber für eine häufige Integration zwingend erforderlich. Eine weitere große Herausforderung besteht in der automatisierten Testausführung. Insbesondere in Kombination mit kurzen Rechenzeiten können hier Probleme auftreten. Eine FE-Berechnung zeigt diese Gegensätze anschaulich. Eine feine Vernetzung führt bei FE-Modellen in der Regel zu geringeren Streuungen der Ergebnisse bei wiederholten Berechnungen unter gleichen Randbedingungen. Dadurch lassen sich die Ergebnisse wiederum einfacher automatisiert auswerten. Mit einem feineren Netz steigt jedoch die Rechenzeit. Somit bedarf es an dieser Stelle einer Optimierung aus Rechenzeit und Ergebnisstabilität. Ein weiteres Hindernis, neben der automatisierten Auswertung, ist aber auch die automatisierte Testausführung. Nicht zuletzt sind natürlich das Verständnis, die Erfahrung und die Kenntnisse des Entwicklers für eine erfolgreiche automatisierte Testumgebung unabdingbar.

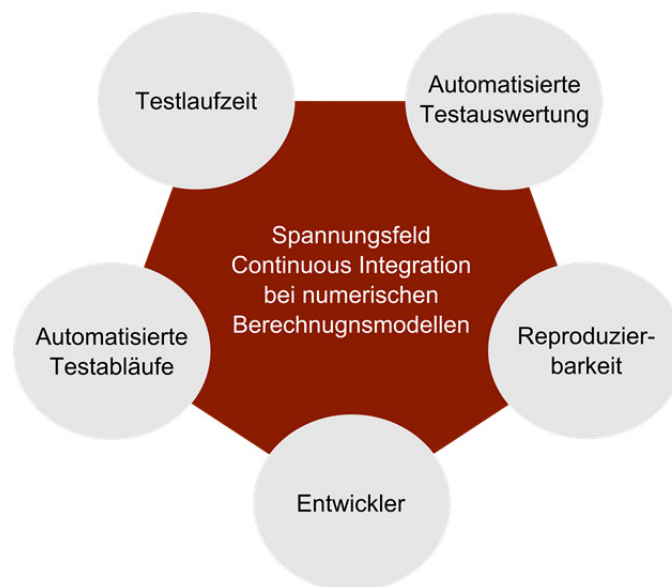


Abbildung 4: Herausforderungen zur Einführung von Continuous Integration für numerische Berechnungsmodelle [3]

Eine am Institut für Maschinenwesen entwickelte Anwendung, testING genannt, versucht einige dieser Herausforderungen zu adressieren. Zunächst unterstützt die Software den Entwickler bei der Definition der Testfälle. Aktuell ist es möglich, Ansys Classic Modelle und Fortran- sowie C/C++-Programmcode zu testen. Für die Auswertung stehen ebenfalls mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Auch für die Herausforderung der Testlaufzeiten ist eine Lösung integriert. Bei jedem Testlauf berechnet testING für alle an dem Test beteiligten Dateien Prüfsummen und legt diese zusammen mit den Testergebnissen in

einer internen Datenbank ab. Bei dem nächsten Testlauf ermittelt testING mit Hilfe der zuvor abgelegten Prüfsummen, ob sich zum Test gehörige Dateien geändert haben. Haben sich keine Dateien geändert, ist das gleiche Resultat zu erwarten, wie im vorhergehenden Durchlauf. Daher werden die alten Ergebnisse zurückgemeldet, ohne den Test tatsächlich auszuführen. Dies reduziert die Testlaufzeit ohne Konfiguration durch den Anwender auf ein notwendiges Minimum. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Softwarearchitektur von testING ist unter [3] zu finden. Ein besonderes Merkmal von testING ist der modulare Aufbau. So können weitere Testarten wie auch Auswertestrategien mit verhältnismäßig geringem Aufwand integriert werden.

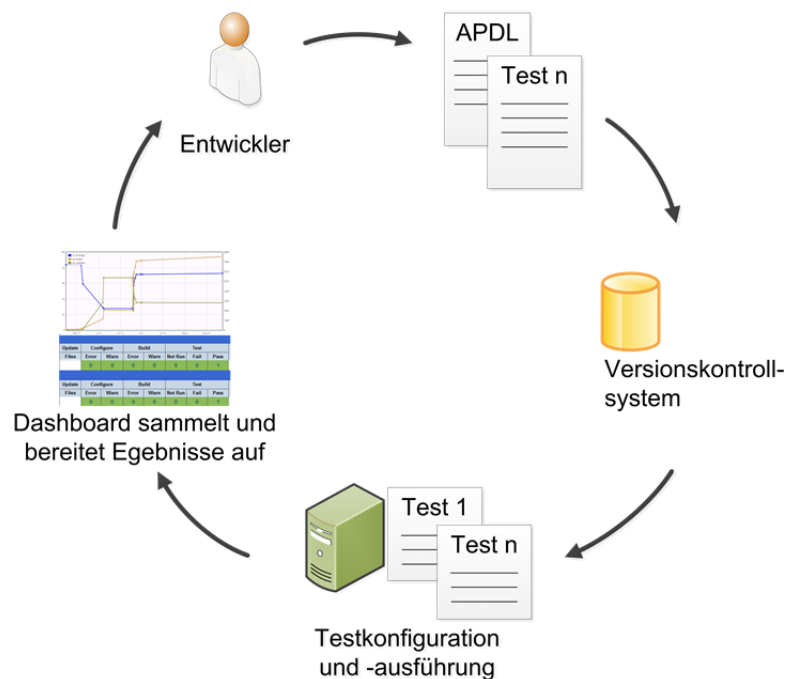


Abbildung 5: An das CI-Konzept angepasster Entwicklungsprozess für numerische Berechnungsmodelle am Beispiel eines Ansys Classic Modells

## 4 Auswirkungen auf die Arbeit des Entwicklers numerischer Modelle

Die Anwendung des Continuous Integration zum Testen numerischer Modelle bringt ebenfalls Veränderungen für den Entwickler der Berechnungsmodelle mit sich (s. Abbildung 5). Die größte Veränderung ist die Arbeit mit einem Versionskontrollsystem unter Berücksichtigung der CI-Anforderungen. Dies bedeutet, dass zunächst ein Versionskontrollsystem vorhanden sein muss. Das kann ein Produktdatenmanagementsystem sein oder auch Systeme, die in der Softwareentwicklung verbreitet sind (Beispielsweise Sub-

version). Unabhängig vom System muss der Entwickler darauf achten, möglichst atomare Änderungen einzuchecken. Das bedeutet, dass jede Änderung, die für sich eigenständig ist, sofort in das Versionskontrollsystem übertragen werden soll. Nur so ist eine schnelle Zuordnung der Testergebnisse zu einer Problemquelle möglich. Weiterhin muss zu jeder Änderung natürlich direkt ein Test implementiert und ebenfalls im Versionskontrollsystem abgelegt werden. Daraus folgt, dass die Modelle stets Schritt für Schritt aufgebaut und getestet werden müssen. Hinzu kommt, dass die automatisiert ablaufenden Tests den Entwickler zwingen, die Anwendungs- und Fehlanwendungsfälle vorweg zu denken und maschinell reproduzierbar abzubilden. Das erleichtert jedoch die Angabe der Grenzen des Berechnungswerkzeuges gegenüber dem späteren Nutzer.



Im Falle des oben genannten FVA Vorhabens führte das beispielsweise dazu, dass 4079 Zeilen Programmcode für eine Mehrkörpersimulation entstanden. Weitere 1922 Zeilen Programmcode testen diese Funktionalität. Das verwendete FEM-Modell besteht hingegen aus 554 Zeilen Programmcode und kann mit lediglich 57 Zeilen getestet werden.



## **5 Anwendung von testING für die FEM-Simulation im Rahmen des FVA-Vorhabens 563 I, „Axiale Belastbarkeit der Freiläufe“**



Als gemeinsame Codebasis kommt in diesem Fall das aus der Softwareentwicklung bekannte Versionskontrollsystem Subversion [4] zum Einsatz. Die Konfiguration der Testumgebung, die Verteilung der Tests auf verschiedene Ressourcen und den Start der Tests übernimmt die Software Jenkins [5]. Sobald in das Versionskontrollsystem Code eing检echt wird, löst Subversion in Jenkins den Teststart aus. Die eigentlichen Tests führt testING aus und meldet das Ergebnis an eine zentrale Informationssammelstelle. Diese Sammelstelle, Dashboard genannt, ist in diesem Fall die Anwendung CDash [6]. Diese bereitet die Ergebnisse grafisch auf, archiviert sie und informiert alle interessierten Personen per E-Mail über neue Testergebnisse.


Die für den Test des, mit Ansys Classic erstellten, FE-Modelles benötigten Daten zeigt Abbildung 6. Zunächst ist eine APDL-Datei anzugeben, die das parametrisierte Berechnungsmodell enthält. Zudem ist eine weitere APDL-Datei zu benennen, die das Postprocessing der Berechnung übernimmt und in diesem Fall eine CSV-Datei erzeugt. Schließlich können Parameter definiert und mit diesen Testfälle angelegt werden, die für die Parameter konkrete Werte enthalten. Jedem Testfall wird ferner eine Auswertestrategie zu-

geordnet. Da der Postprozessor von Ansys hier eine CSV-Datei erzeugt, vergleicht testING die erzeugte CSV-Datei mit einer vorgegebenen CSV-Datei. Um numerische Schwankungen abzufangen, sind zudem Vorgaben für die zulässige absolute und relative Abweichungen der berechneten Werte gegenüber den vorgegebenen Werten enthalten. Die unten gezeigten Werte ergaben im Rahmen dieser Anwendung stabile Ergebnisse.



Calculation APDL File:   

Postprocessing APDL File:   



Ansys Executable:   

License:  

Testcases:



Parameters:  


|           | Testcase Name  | 1              | 2                | 3                 | 4                 |
|-----------|----------------|----------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Parameter |                | anzahlSchritte | aussenringBreite | aussenringDurc... | aussenringDurc... |
| Case 1    | ✓ konfKontG... | 1              | 10               | 32                | 28                |



Testcases:  

Resulthandler

Resulthandler:

Original File:   

Generated File:  

Delta Relative:   

Delta Absolute:

Separator:

Abbildung 6: Benötigte Daten für das Testen eines Ansys Classic Modelles in testING

Die Ergebnisse der Tests können vom Entwickler direkt in der grafischen Benutzeroberfläche analysiert werden (s. Abbildung 7a). Im Falle des Pilotprojektes ist testING so konfiguriert, dass es die Ergebnisse zusätzlich an ein Dashboard überträgt. Dieses bereitet die Daten grafisch auf, bildet Historien (bspw. über Testlaufzeiten) und informiert alle Beteiligten über neue Testergebnisse. Sobald die Tests automatisch, nach jedem Checkin in das Versionskontrollsystem, starten und auf einem Maschinenpool verteilt laufen, gewinnt das Dashboard an Bedeutung. Für diesen Einsatzzweck enthält testING eine Konsolenanwendung, die die Tests ausführt und, sofern konfiguriert, an ein Dashboard überträgt. Ohne diese Informationszentrale (s. Abbildung 7b), müsste der für den Checkin verant-



wortliche Mitarbeiter die Testergebnisse manuell zusammentragen. Diese Arbeit nimmt ihm das Dashboard ab und informiert ihn aktiv.

The screenshot shows the testING interface. On the left, a table lists test results:

| Site   | Build Name       | Configure | Build | Not Run | Fail | Pass |
|--------|------------------|-----------|-------|---------|------|------|
| 1 FEM2 | Reibmodell       | ✓         | ✓     | 0       | 0    | 1    |
| 2 FEM2 | konfKontGauss145 | ✓         | ✓     | 0       | 0    | 1    |

On the right, a detailed log for the test 'konfKontGauss145-0' is shown. The log indicates that the test passed validation and preparation, but failed during the run phase due to shape testing warnings. The warnings state that 80 of the 560 new or modified elements violate shape warning limits, and 960 of the 6720 new or modified elements violate shape warning limits. The log also shows the command used: 'E:/FemTest/epartexe.exe'.

a: in der grafischen Oberfläche von testING

| Ansys |                  |        |           |      |       |      |         |      |      |                |
|-------|------------------|--------|-----------|------|-------|------|---------|------|------|----------------|
| Site  | Build Name       | Update | Configure |      | Build |      | Test    |      |      | Build Time     |
|       |                  | Files  | Error     | Warn | Error | Warn | Not Run | Fail | Pass |                |
| FEM2  | konfKontGauss145 |        | 0         | 0    | 0     | 0    | 0       | 0    | 1    | 12 minutes ago |

| CMake |            |        |           |      |       |      |         |      |      |                |
|-------|------------|--------|-----------|------|-------|------|---------|------|------|----------------|
| Site  | Build Name | Update | Configure |      | Build |      | Test    |      |      | Build Time     |
|       |            | Files  | Error     | Warn | Error | Warn | Not Run | Fail | Pass |                |
| FEM2  | Reibmodell |        | 0         | 0    | 0     | 0    | 0       | 0    | 1    | 12 minutes ago |

b: mit Hilfe des Dashboardes im Browser

Abbildung 7: Testanalyse

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe der selbst entwickelten Softwareanwendung testING konnte das CI Konzept aus der Softwareentwicklung auf numerische Berechnungswerkzeuge übertragen werden. In der aktuellen Version ist das Testen von Ansysmodellen sowie Fortran- und C/C++-Quellcode möglich. Der modulare Aufbau ermöglicht jedoch auch die Integration weiterer Testbereiche. So ist die Erweiterung von testING für Testmöglichkeiten von MKS-Modellen mit der Software Simpack geplant.

In der praktischen Anwendung zeigte sich, dass das Testen der Ansys Classic Modelle mit geringem Aufwand des Entwicklers möglich war. Hier wirkt sich positiv aus, dass der

Maschinenbauingenieur die Ansystests mit seinem vorhandenen Wissen erstellen kann und sich lediglich an die neuen Abläufe gewöhnen muss. Im Rahmen des FVA-Vorhabens wurde ebenfalls Fortran-Code getestet. Hier zeigte sich eine größere Einstiegshürde für den Maschinenbauingenieur, da erst Grundsätze des Unit-Testing aus der Softwareentwicklung erlernt werden mussten. Dennoch lohnte sich auch hier der Aufwand, da nur so eine systematische Fehlersuche möglich wurde.

## Literatur

- [1] Nagler, N.; Lohrengel, A.: Axiale Belastbarkeit der Freiläufe. Zwischenbericht. Forschungsreport 2013. Band 2. S. 203-214. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2013
- [2] Duvall, P. M.; Matyas, S.; Glover, A.: Continuous integration: improving software quality and reducing risk. Addison-Wesley, 8. Ausgabe, 2013 – ISBN 978-0-321-33638-5
- [3] Langenbach, J.; Nagler, N.: Berechenbare Berechnungswerkzeuge. IMW – Institutsmitteilung Nr. 38, Clausthal-Zellerfeld, 2013
- [4] Webseite Apache Subversion: <http://subversion.apache.org>
- [5] Webseite Jenkins: <http://jenkins-ci.org>
- [6] Webseite CDash: <http://www.cdash.org>

## Entwicklung und Anwendung von neuartigen plastischen Materialmodellen für die Finite-Elemente-Analyse

Christoph Wehmann, Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth

E-Mail: christoph.wehmann@uni-bayreuth.de; Internet: <http://www.lscad.de>

**Inhalt:** Die Materialmodellierung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit von Finite-Elemente-Analysen. Insbesondere bei hohen Belastungen ist eine möglichst exakte Beschreibung des Materialverhaltens ausschlaggebend für die sichere Auslegung von Bauteilen und Maschinenelementen. Ein Großteil der in der Technik eingesetzten Werkstoffe verhält sich bei hohen Spannungen plastisch, d.h. es treten bleibende Deformationen auf. In dem vorliegenden Beitrag wird zunächst ein Überblick über die nach Stand der Technik vorhandenen plastischen Materialgesetze gegeben. Es erfolgt eine Erläuterung der Behandlung dieser Gesetze im Rahmen der Finite-Elemente-Analyse, wobei auf die erforderlichen Algorithmen und Elementtechniken eingegangen wird. Außerdem werden Anwendungsbeispiele beschrieben, bei denen der Einsatz plastischer Materialmodelle zu einer deutlichen Verbesserung der Abbildungsgenauigkeit führt. Anschließend werden neuartige Materialmodelle entwickelt, die eine veränderte Fließrichtung besitzen und dadurch eine entkoppelte Steuerung der plastischen Querkontraktion erlauben. Der Beitrag enthält auch eine Beschreibung der zur Lösung dieser neuartigen Materialgesetze erforderlichen Erweiterungen der Finite-Elemente-Analyse. Schließlich werden anhand eines TRIP-Stahls Anwendungsgebiete der neuartigen Plastizitätsmodelle vorgestellt.

**Abstract:** The accuracy of finite element analyses is significantly influenced by the modeling of the material behavior. Especially at high loads, an exact description of the material behavior is crucial for the safe design of parts and machine elements. Most of the materials used in technical applications behave plastically at high stresses. This means that residual strains occur. The present contribution begins with an overview over the material models belonging to the state of the art. It is explained, how the finite element analysis has to be extended for being able to capture these material models. In this context, it is referred to the required algorithms and element technologies. Furthermore, examples of applications are described in which plastic material models lead to a significant improvement of the accuracy. Afterwards, new material models are developed which have a modified flow direction and therefore, allow a decoupled control of the plastic transverse contraction. The contribution also contains a description of the solution methods suitable for solving these new material models during finite element analyses. Finally, fields of application of these models are shown at the example of a TRIP steel.

**Stichwörter:** Finite-Elemente-Analyse, Nichtlinear, Plastizität, TRIP-Stahl

**Keywords:** Finite Element Analysis, non-linear, plasticity, TRIP steel

## 1 Einleitung

Die Materialmodellierung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit von Finite-Elemente-Analysen. Insbesondere bei hohen Belastungen ist eine möglichst exakte Beschreibung des Materialverhaltens ausschlaggebend für die sichere Auslegung von Bauteilen und Maschinenelementen. Ein Großteil der in der Technik eingesetzten Werkstoffe verhält sich bei hohen Spannungen plastisch, d.h. es treten bleibende Deformationen auf. Dies ist vor allem bei Metallen, aber auch bei den meisten Kunststoffen der Fall. Keramische Werkstoffe dagegen weisen keinen plastischen Bereich auf, sie versagen am Ende des elastischen Bereichs. Generell wird das Ende des elastischen Bereichs durch die Streckgrenze  $R_e$  beschrieben. Existiert keine ausgeprägte Streckgrenze, wird stattdessen die Dehngrenze  $R_{p0,2}$  herangezogen. In einem großen Teil der Anwendungen setzt der Konstrukteur diese Werkstoffkennwerte als Auslegungsgrenze ein. Bei sehr hohen Anforderungen können aber auch begrenzte plastische Deformationen zugelassen werden, um das Material besser auszunutzen.

Außerdem können konstruktionsbedingte Spannungsspitzen, z.B. in Kerben, vielfach nur sinnvoll berechnet werden, wenn auch der plastische Bereich erfasst wird. Denn lokal begrenzte Bereiche weisen bei vergleichsweise niedrigen Belastungen mitunter schon plastische Deformationen auf, die für das globale Verhalten des Bauteils unerheblich sind. Wird in diesen Fällen das plastische Materialverhalten nicht mit modelliert, ergeben sich sehr hohe Spannungen, die bei konventioneller Auslegung zu einer unnötig massiven Konstruktion führen.

Schließlich müssen plastische Materialmodelle mit Versuchsdaten verifiziert werden, um eine präzise Spannungs- und Verschiebungsberechnung zu gewährleisten. Je nach Werkstoff treten dabei Besonderheiten auf, die nicht mit allen Modellen erfasst werden können. Im Folgenden werden zunächst die nach Stand der Technik vorhandenen Modelle aufgeführt und hinsichtlich ihrer Anwendungsgebiete spezifiziert. Anschließend erfolgt die Entwicklung eines neuartigen Plastizitätsmodells und dessen Anwendung auf einen TRIP-Stahl.

## 2 Stand der Technik von plastischen Materialmodellen

Erste Überlegungen zum Beginn des plastischen Fließens wurden 1864 von Tresca angestellt. Tresca's Spannungshypothese geht davon aus, dass das plastische Fließen beginnt, sobald die maximale Schubspannung einen kritischen Wert übersteigt. Entsprechend lässt sich eine Fließfunktion  $f$  definieren, mit deren Hilfe der Beginn des plastischen Fließens berechnet werden kann. Es gilt:

$$f(\sigma) = \tau_{max} - k_f \quad (1)$$

Darin ist  $k_f$  die Fließspannung, die zu Beginn des plastischen Fließens mit der Streckgrenze übereinstimmt. Sind die Spannungen gering, so dass  $f < 0$  gilt, liegt elastisches Materialverhalten vor. Steigen die Spannungen bis der Fall  $f = 0$  eintritt, kommt es zu plastischen Verformungen. Die Formulierung von  $f$  als Funktion der Hauptspannungen erlaubt die Darstellung der Fließbedingung  $f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0$  als Fläche im Raum. Bei der Fließbedingung von Tresca ergibt sich als Fläche ein Prisma mit sechseckiger Grundfläche. Die Mittelachse ist die Raumdiagonale im  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  –Diagramm, die auch hydrostatische Achse genannt wird. Da die mathematische Behandlung der sechseckigen Fließfläche bei Tresca schwierig ist, schlug von Mises vor, den umschreibenden Kreis zu verwenden [1]. Daraus ergibt sich als Fließfläche die Mantelfläche eines Zylinders, dessen Mittelachse wieder die hydrostatische Achse ist. Die Fließfunktion nach von Mises ist nachfolgend dargestellt.

$$f(\sigma) = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (\sigma_{ij} - p \delta_{ij}) (\sigma_{ij} - p \delta_{ij})} - \sqrt{\frac{2}{3}} k_f \quad (2)$$

Darin sind  $p = 1/3 (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$  der hydrostatische Druck und  $\delta_{ij}$  das Kronecker-Symbol. Der Vorfaktor  $\sqrt{2/3}$  wird hier eingefügt, um die Ableitungen der Fließfunktion kompakter schreiben zu können. Der Ausdruck in den Klammern von Gleichung (2) entspricht den Deviatorspannungen  $s_{ij}$ , somit ist die Fließbedingung nach von Mises allein von diesen abhängig. Es gilt  $f = f(s) \neq f(p)$  und dies bedeutet, dass das plastische Fließen unabhängig vom hydrostatischen Druck ist.

Die meisten Metalle zeigen beim plastischen Fließen keine Abhängigkeit vom hydrostatischen Druck. Ausnahmen bilden z.B. poröse Sintermetalle oder Anwendungsfälle mit sehr hohen hydrostatischen Spannungen. Für diese Fälle existiert die Fließbedingung von

Drucker und Prager, die eine Abhängigkeit vom hydrostatischen Druck aufweist [2]. Weitere Plastizitätsmodelle wie beispielsweise das Modell von Hill [3] und das von Barlat [4] sind in der Lage, Anisotropien bei der plastischen Verformung zu erfassen. Solche Anisotropien treten aufgrund des Walzprozesses bei Blechwerkstoffen auf. Schließlich existieren Modelle, die zusätzlich zu den plastischen Werkstoffeigenschaften auch viskose Eigenschaften berücksichtigen können. Becker und Hackenberg haben ein solches viskoplastisches Gesetz aufgestellt, welches sich besonders für Hochtemperaturanwendungen eignet [5].

Insgesamt sind mit der Fließbedingung drei Gesetze erforderlich, um ein Plastizitätsmodell für die Finite-Elemente-Analyse zu definieren [6]:

- Fließbedingung
- Verfestigungsgesetz
- Fließregel

Hinsichtlich des Verfestigungsgesetzes sind nach Stand der Technik ebenfalls verschiedene Möglichkeiten bekannt. Die einfachste Variante ist die ideal-plastische Verfestigung, bei der sich die Fließgrenze nicht ändert. Das bedeutet, die Spannung steigt mit zunehmender Dehnung entlang der Hooke'schen Geraden und bleibt ab der Fließgrenze auch bei zunehmender Dehnung konstant. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, einen bilinearen Ansatz zu verwenden. Dabei nimmt die Spannung oberhalb der Fließgrenze linear, mit einer anderen (geringeren) Steigung zu. Eine Weiterentwicklung dieses Modells ist die multi-lineare oder nichtlineare Verfestigung, bei der ein beliebiger Spannungs-Dehnungs-Verlauf vorgegeben werden kann.

Daneben gibt es Verfestigungsgesetze für anisotrope Verfestigung, die verschiedenen Materialrichtungen verschiedene Verfestigungseigenschaften zuweisen und Gesetze für kinematische Verfestigung, die eine Erfassung von Zug-Druck-Asymmetrien ermöglichen.

Während für die Fließbedingung und das Verfestigungsgesetz verschiedene Möglichkeiten bekannt und erforscht sind, existiert für die Fließregel nach Stand der Technik nur ein Gesetz: das Orthogonalitätsprinzip. Bei diesem Gesetz steht die Fließrichtung immer senkrecht auf der Fließfläche [7]. Im vorliegenden Beitrag werden Modelle vorgestellt, die eine entkoppelte, parameterdefinierte Fließrichtung besitzen, welche nicht zwingend immer senkrecht zur Fließfläche stehen muss.

### 3 Numerische Behandlung von Plastizität und Anwendungen

Plastisches Materialverhalten erfordert die Lösung eines nichtlinearen Gleichungssystems. Daher ist der numerische Aufwand bei einer plastischen Berechnung ungleich höher als bei einer elastischen Berechnung. Im Folgenden wird auf die Besonderheiten bei der FEA eingegangen, die bei Vorliegen von Plastizität auftreten. Außerdem werden Anwendungsbeispiele plastischer Berechnungen behandelt.

#### 3.1 Finite-Elemente-Techniken bei Plastizität

Ein grundlegender Unterschied zwischen Elastizität und Plastizität besteht darin, dass bei Plastizität zwei Dehnungen anstatt einer vorliegen: eine elastische Dehnung und eine plastische Dehnung. Bei kleinen Dehnungen ergeben sich die Gesamtdehnungen  $\varepsilon$  durch Addition elastischer und plastischer Dehnungen.

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} \quad (3)$$

Während bei der elastischen FEA die elastischen Dehnungen mit Hilfe der B-Matrix und der Verschiebungen berechnet werden können, lassen sich bei der plastischen Analyse die Gesamtdehnungen über B-Matrix und Verschiebungen berechnen.

$$\varepsilon = B u \quad (4)$$

Für plastische FE-Berechnungen muss die B-Matrix jedoch neu entwickelt werden. Die Begründung dafür liegt in der Inkompressibilität der plastischen Verformung bei Modellen wie z.B. der Fließbedingung nach von Mises. Hier bewirkt die plastische Verformung keine Volumenveränderung. Es lässt sich zeigen, dass die in der elastischen FEA eingesetzten, finiten Elemente diese Inkompressibilitätsbedingung nicht im gesamten Element erfüllen. Am Beispiel eines 8-Knoten-Hexaeders leiten Zhu & Cescotto diese Erkenntnis detailliert her [8]. Werden die Elemente der elastischen FEA trotzdem verwendet, treten sogenannte „Locking-Effekte“ auf und die Struktur verhält sich unrealistisch steif. Zur Lösung der Problematik existieren verschiedene Möglichkeiten. Dazu gehören:

- Reduktion der Integration
- „Enhanced Strain-Elemente“
- die „B-Bar Method“

Die Verwendung einer reduzierten Integration ist eine sehr einfache Lösung. Bei einem 8-Knoten-Hexaeder würde dies bedeuten, anstatt von acht Integrationspunkten nur einen Integrationspunkt zu verwenden [8]. Dies wäre auch sehr vorteilhaft für die Rechenzeit, da die Berechnung der Elementmatrizen und der inneren Kräfte sehr viel schneller abläufe. Jedoch zeigen Zhu & Cescotto in [8], dass dadurch ein Rangabfall der B-Matrix auftritt und somit kein reguläres Gleichungssystem bestimmt wird. Wird dieses Vorgehen trotzdem angewandt, entstehen unrealistische Verformungsbilder, die die Form von Stundengläsern haben. Die entsprechenden Verformungsmoden werden daher als „Hourglass-Moden“ bezeichnet [8]. Es gibt die Möglichkeit, zur Vermeidung des Hourglass-Effekts die B-Matrix zu modifizieren. Darauf soll jedoch hier nicht weiter eingegangen werden, näheres dazu findet sich bei Zhu & Cescotto.

Die zweite Möglichkeit, die Verwendung von Enhanced Strain-Elementen, beruht auf der Verwendung des Variationsprinzips von Hu und Washizu und führt auf Hybridelemente, die neben Verschiebungen auch Spannungen und Dehnungen interpolieren [9]. Deren Elementformulierung ist allerdings sehr aufwendig und wird an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, denn es existiert eine weitere Elementtechnik mit der gleichen Performance, die deutlich kompakter ist: die B-Bar Method von Simo und Hughes.

Die folgenden Ausführungen zur B-Bar Method basieren auf [10]. Die Methode beruht auch auf dem Hu-Washizu-Prinzip, verwendet aber spezielle Interpolationen von Spannungen und Dehnungen. Es werden lediglich der hydrostatische Druck  $p$  und die Volumendehnung (Dilatation)  $\theta$  interpoliert. Simo und Hughes gewinnen durch ihr Vorgehen die nachstehende Matrizengleichung.

$$\iiint_V \bar{\mathbf{B}}^T \boldsymbol{\sigma} dV = \mathbf{F} \quad (5)$$

Diese besitzt die gleiche Form wie bei der elastischen FEA. Dies erwies sich als sehr vorteilhaft für die Implementation der entsprechenden finiten Elemente in das FE-System Z88 / Z88Aurora, mit welchem die vorliegenden Untersuchungen durchgeführt wurden. So konnte auf Programmstruktur von Z88, die in [11] detailliert beschrieben ist, weitestgehend zurückgegriffen werden. In Gleichung (5) ist  $\bar{\mathbf{B}}$  die modifizierte B-Matrix, der Querstrich ist Namensgeber der Methode. Die B-Matrix setzt sich dabei gemäß Gleichung (6) aus einem isochoren und einem volumetrischen Anteil zusammen.



$$\bar{\mathbf{B}}^T = \mathbf{B}_{iso}^T + \bar{\mathbf{B}}_{vol}^T \quad (6)$$

Der isochore Anteil wird über die Verschiebungsinterpolation berechnet, der volumetrische Anteil über die Interpolation der Spannungen und Dehnungen. Das nichtlineare Gleichungssystem (5) kann mit dem Newton-Raphson-Verfahren gelöst werden. Auch hier kann auf die Strukturen von Z88 zurückgegriffen werden. Denn der in Z88Aurora V2 integrierte, nichtlineare Gleichungslöser Z88NL arbeitet unter anderem mit dem Newton-Raphson-Verfahren [11]. Die hier beschriebene B-Bar Method wird zur Zeit in die neue Version Z88Aurora V3 implementiert, die als nächstes im Internet verfügbar sein wird [12].

Für das Newton-Raphson-Verfahren ergibt sich das nachstehende, linearisierte Gleichungssystem.

$$\mathbf{K}_{T(i)} \Delta \mathbf{u}_{(i+1)} = \mathbf{F} - \mathbf{I}_{(i)} \quad (7)$$

Hier sind  $\mathbf{K}_T$  die Tangentenmatrix,  $\Delta \mathbf{u}$  das Verschiebungsinkrement für den Iterationsschritt  $(i + 1)$ ,  $\mathbf{F}$  die äußeren Lasten und  $\mathbf{I}$  die inneren Kräfte. Schließlich kann mit (8) die Tangentenmatrix berechnet werden.

$$\mathbf{K}_T = \iiint_V \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{C} \bar{\mathbf{B}} dV \quad (8)$$

Hier tritt zusätzlich die Materialmatrix  $\mathbf{C}$  auf. Finite Elemente auf Basis der B-Bar Method sind frei von Locking- und Hourglass-Effekten und sind aufgrund der vielen Analogien zur elastischen FEA ideal in ein bestehendes FE-System zu implementieren. Im Folgenden werden zwei auf diesem Weg entwickelte Elemente für verschiedene Anwendungen herangezogen. Es handelt sich dabei um ein 10-Knoten-Tetraeder und ein 8-Knoten-Hexaeder.

### 3.2 Anwendungen

Plastisches Materialverhalten tritt bei hohen Beanspruchungen auf, es wird daher in hoch belasteten Anwendungen und für die Analyse von Schadensfällen herangezogen. Typisches Beispiel für Schadensfälle sind Crash-Simulationen. Weitere allgemeine Anwendungsfelder sind Umform- und Zerspanungssimulationen.

Der Fall hoher Beanspruchungen wurde in [13] und [14] am Beispiel von Dehnschrauben untersucht. Hier konnte durch Erfassung des plastischen Materialverhaltens eine

deutliche Steigerung der Lastkapazität von Dehnschrauben erreicht werden. Eine Kenntnis der Fließkurve vorausgesetzt, können so zusätzliche Reserven genutzt werden.

Die Fließkurve kann aus der Spannungs-Dehnungs-Kurve gewonnen werden, indem die Spannung über der plastischen Dehnung anstatt über der Gesamtdehnung aufgetragen wird. Diese Kurve ist neben den elastischen Werkstoffparametern, E-Modul und Querkontraktionszahl, an das FE-System zu übergeben. Abbildung 1 zeigt den Eingabedialog für plastische Werkstoffdaten in Z88Aurora V3.

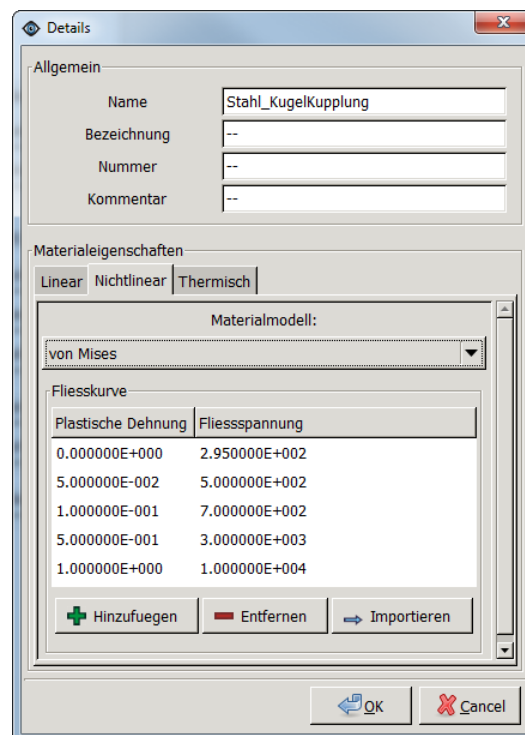


Abbildung 1: Eingabe der Fließkurve in Z88Aurora V3 (Entwicklungsversion)

Die plastische Dehnung ist dimensionlos, d.h. der Wert 0.05 beispielsweise entspricht 5 % plastischer Dehnung. Die Einheit der Spannung ist  $N/mm^2$ . Die gezeigten Werte werden für das nächste Anwendungsbeispiel herangezogen, welches mit Z88Aurora V3 einmal elastisch und einmal plastisch berechnet wurde. Es soll der Überlastfall einer Kugelpkupplung aus der Landtechnik betrachtet werden. Es handelt sich um die in Abbildung 2 gezeigte Kupplung, die an einem Traktor montiert ist und zum Ankuppeln von Starr-Deichselanhängern mit hoher Stützlast dient. Dies können beispielsweise Häckselwagen, Mulden oder Silierwagen sein.



Abbildung 2: Kugelkupplung an einem Traktor

Als Lastfall wird eine extreme Überlastung betrachtet, bei der 10 t Stützlast wirken und 6 t Zuglast. Solche Lasten können bei Überladung auftreten, wenn der Anhänger steil bergauf gezogen wird.

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der elastischen Berechnung, dargestellt sind die Spannungen pro Element. Es ist zu sehen, dass eine maximale Elementspannung von  $370 \text{ N/mm}^2$  auftritt. Die maximale Gaußpunktspannung beträgt sogar  $495 \text{ N/mm}^2$ . Da die Elementspannungen Mittelwerte aus den Gaußpunktspannungen darstellen, ist die maximale Elementspannung geringer als die maximale Gaußpunktspannung. Wird beispielhaft als Material ein Maschinenbaustahl E295 angenommen, liegt die Spannung bereits deutlich über der Streckgrenze und ein Versagen müsste angenommen werden.

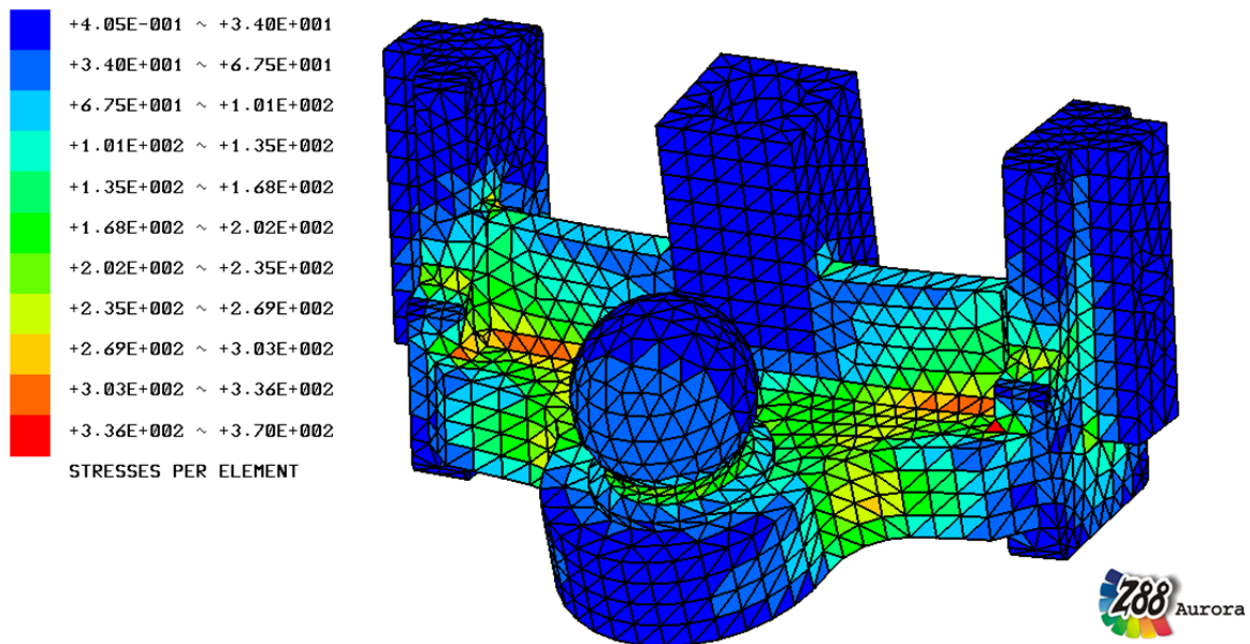


Abbildung 3: Ergebnis der Spannungsberechnung, dargestellt in Z88Aurora

Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, treten die Maximalspannungen sehr lokal begrenzt auf. Dies bedeutet, es wird hier auch nur lokal begrenzt zu plastischen Deformationen kommen. Die plastische Berechnung mit Z88Aurora V3 liefert für die gleiche Belastung eine Maximalspannung von lediglich  $305 \text{ N/mm}^2$ , d.h. der Wert liegt zwar knapp über der Streckgrenze, aber deutlich unterhalb der Zugfestigkeit. Dies zeigt, dass auch nur sehr geringe plastische Deformationen auftreten. Die Verfestigung sorgt hier für eine gewisse Reduktion der Spannung. Der Hauptteil der Reduktion tritt aber auf, weil die plastische Verformung dafür sorgt, dass Bereiche um die Maximalspannung höher beansprucht werden. Es kommt sozusagen zu einer „harmonischeren“ Verteilung der hohen Spannungen. Dieses Beispiel belegt, dass eine plastische Berechnung deutlich realistischere Spannungsergebnisse liefert, denn die betrachtete Kugelkupplung ist im praktischen Einsatz und versagt auch bei solch hohen, tatsächlich auftretenden Lasten nicht.

Schließlich soll in den nächsten Kapiteln ein Beispiel mit speziellen Materialien (TRIP-Stählen) betrachtet werden. Solche Stähle werden z.B. für Karosseriebleche genutzt.

## 4 Entwicklung neuartiger Plastizitätsmodelle

In Kapitel 2 wurde aufgezeigt, dass die nach Stand der Technik verfügbaren Materialmodelle stets eine Fließrichtung senkrecht zur Fließfläche besitzen. Die Fließrichtung  $n$

gibt nach Gleichung (9) an, in welche Richtung der Vektor der plastischen Dehnungen zeigt.

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_{pl} = d\gamma \mathbf{n} \quad (9)$$

Abbildung 4 zeigt die klassische Fließrichtung, die senkrecht auf der Fließfläche steht, sowie die Fließrichtung eines neuartigen Plastizitätsmodells, welches in [14] entwickelt wurde. Die nachfolgenden Ausführungen zu diesem Modell und weiteren, neuartigen Plastizitätsmodellen basieren auf [14]. Bei dem Modell Plastizität mit parameterdefinierter Fließrichtung (PdF-Modell) kann die Fließrichtung über einen Materialparameter ( $w$ ) beliebig eingestellt werden.

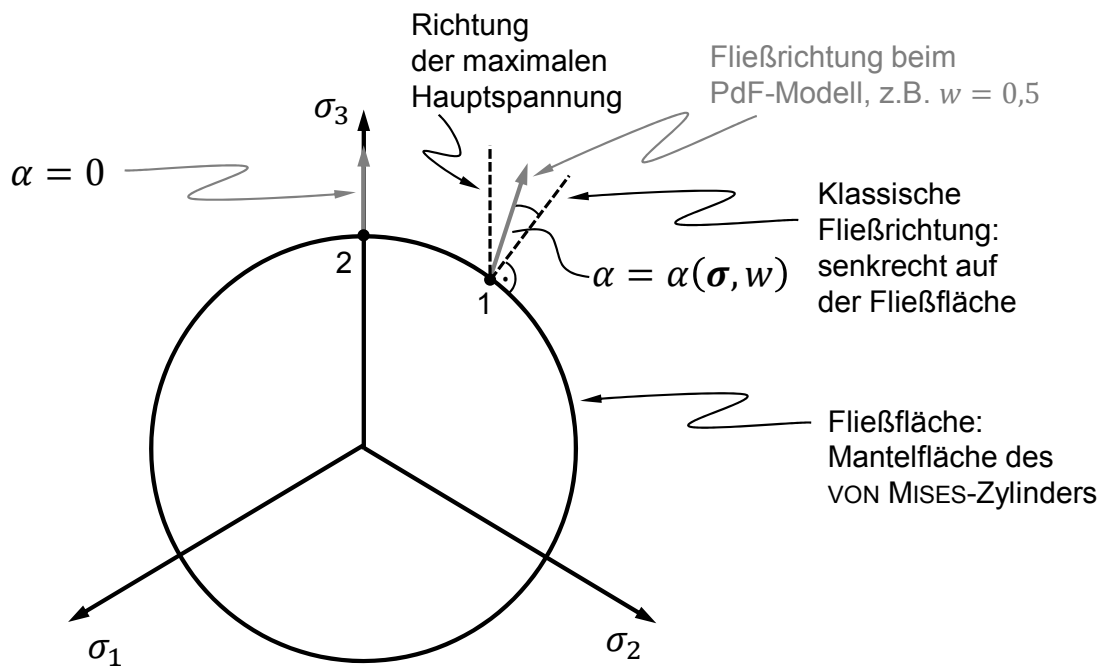


Abbildung 4: Fließrichtung beim PdF-Modell [14]

Die Gleichung für die Fließrichtung beim PdF-Modell ist in (10) zu sehen.

$$\mathbf{n}^{PdF} = \frac{s_I \mathbf{g}_I \mathbf{g}_I^T + w (\mathbf{s} - s_I \mathbf{g}_I \mathbf{g}_I^T)}{\|\mathbf{s}^{PdF}\|} \quad (10)$$

Darin sind  $s_I$  die größte Deviatorhauptspannung,  $\mathbf{g}_I$  die Hauptspannungsrichtung der größten Deviatorhauptspannung und  $\|\mathbf{s}^{PdF}\|$  der Betrag des Zählers. Eine Abwandlung des Modells ist das Modell Plastizität mit paralleler Fließrichtung (PpF-Modell), bei dem der Spezialfall von (10) mit  $w = 0$  eingesetzt wird. Mit Hilfe dieser Modelle wird im nächsten Kapitel ein TRIP-Stahl berechnet.

## 5 Anwendung der Modelle auf einen TRIP-Stahl

Im Folgenden werden Simulationsergebnisse gezeigt, die mit den neuartigen Plastizitätsmodellen aus Kapitel 4 bzw. [14] erhalten wurden. Berechnet wurde ein Zugversuch, wobei die Simulationen auf dem 8-Knoten-Hexaeder basieren. Es erfolgt ein Abgleich mit experimentellen Daten, die [15] entnommen sind. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse.

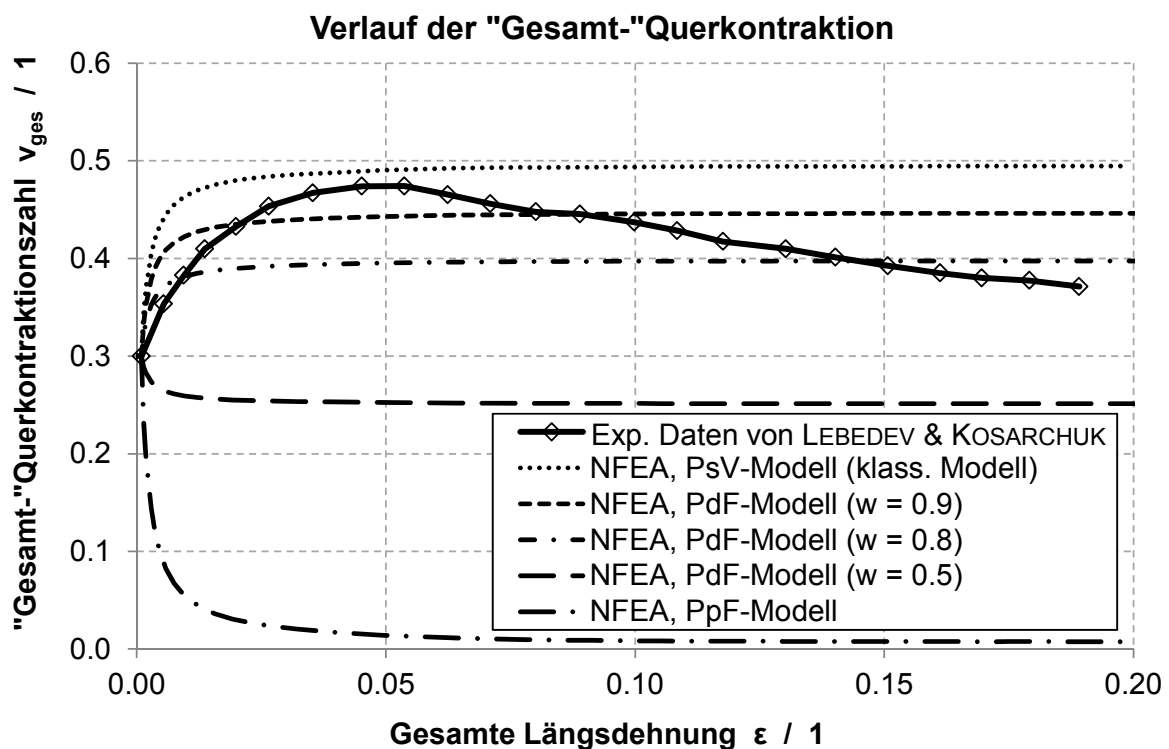


Abbildung 5: Ergebnisse der neuartigen Plastizitätsmodelle [14]

Es wird deutlich, dass die Querkontraktion im Zugversuch mit dem PdF-Modell besser erfasst werden kann als mit dem klassischen Modell, bei welchem die Fließrichtung stets senkrecht auf der Fließrichtung steht. Jedoch kann das Abfallen bei hohen Dehnungen auch mit dem PdF- und dem PpF-Modell nicht vorhergesagt werden. Daher wurde in [14] ein weiteres Modell entwickelt, das einen variablen Fließrichtungsparameter zulässt (PdFv-Modell). Abbildung 6 zeigt, dass dadurch der Verlauf exakt erfasst werden kann.

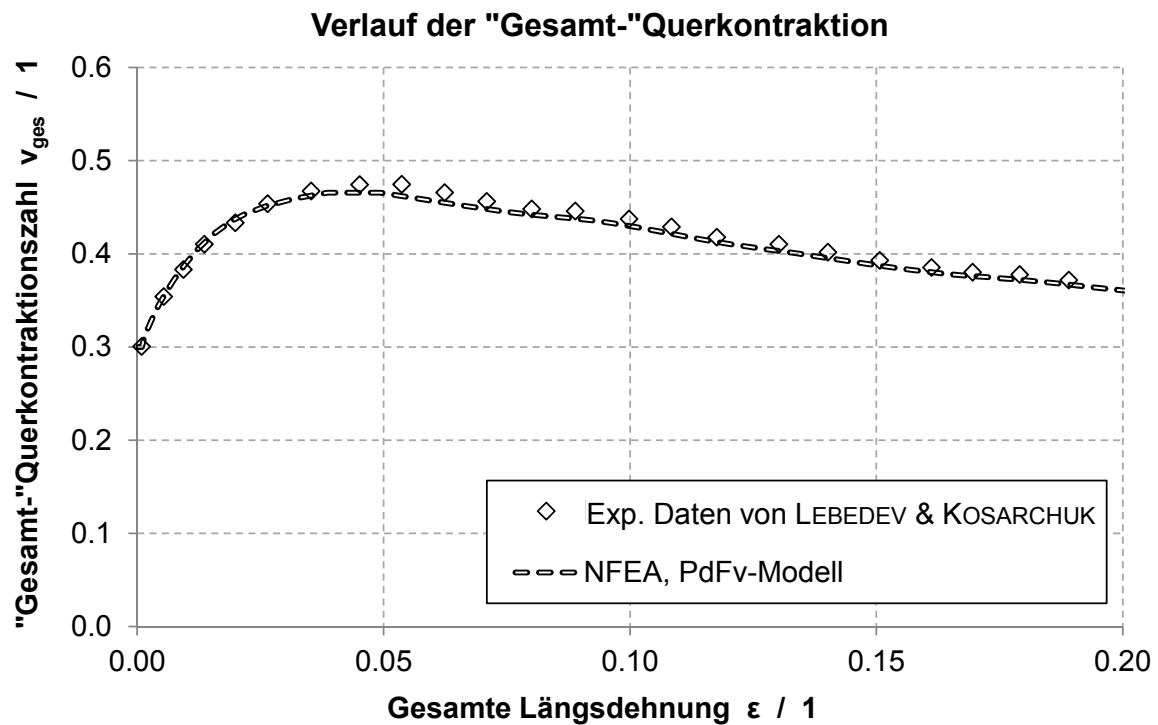


Abbildung 6: Ergebnisse bei variablem Parameter [14]

## 6 Fazit und Ausblick

Es wurde ein Überblick über plastische Materialmodelle gegeben, die nach Stand der Technik vorhanden sind. Deren Einbettung in ein FE-System wurde skizziert und ein Überblick über Anwendungsbereiche wurde gegeben. Der Beitrag enthält die konkrete Betrachtung eines Anwendungsbeispiels aus der Landtechnik. Hier konnte gezeigt werden, dass die plastische Berechnung zu genaueren Spannungsergebnissen bei Überlastfällen führt. Außerdem wurden Ergebnisse von neuartigen Plastizitätsmodellen vorgestellt, die in die aktuelle Entwicklungsversion Z88Aurora V3 integriert wurden. Anhand eines TRIP-Stahls konnte ein Anwendungsbereich dieser Modelle aufgezeigt werden, bei dem eine deutliche Verbesserung der Abbildungsgenauigkeit erreicht wird. Ein Ausblick ist die Weiterentwicklung dieser Modelle, z.B. zur Erfassung von Anisotropien.

## Literatur

- [1] Mises, R. E. v.: *Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand*. Nachrichten der Königlich-Gesellschaft der Wissenschaften, S. 582-592, 1913
- [2] Drucker, D. C.; Prager, W.: *Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design*. Quarterly of Applied Mathematics. Bd. 10, S. 157-165, 1952
- [3] Hill, R.: *A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals*. Proceedings of the Royal Society of London, Bd. 193, S. 281-297, 1948
- [4] Barlat, F., Lege, D. J., Brem. J. C.: *A six-component yield function for anisotropic materials*. Int. J. Plasticity 7, Pages 693-712, 1991
- [5] Becker, M.; Hackenberg, H.-P.: A constitutive model for rate dependent and rate independent inelasticity. Application to IN718. International Journal of Plasticity, Bd. 27, S. 596-619, 2011
- [6] Bathe, K.-J.: *Finite-Elemente-Methoden. Aus dem Englischen übersetzt von P. Zimmermann*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York u.a., ISBN 3-540-66806-3, 2002
- [7] Zienkiewicz, O. C.: *Methode der Finiten Elemente*. Deutsche Übersetzung der englischsprachigen, 3. Auflage von 1977, übersetzt von Beyreuther, J.; Müller, E.; Schumann, M.; 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 1984
- [8] Zhu, Y. Y.; Cescotto, S.: Unified and mixed formulation of the 8-node hexahedral elements by assumed strain method. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., Bd. 129, S. 177-209, 1996
- [9] Wriggers, P.: *Nichtlineare Finite-Element-Methoden*. Springer Verlag, Berlin u.a., 2001
- [10] Simo, J. C.; Hughes, T. J. R.: *Computational Inelasticity*. Springer Verlag, New York u.a., 1998
- [11] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.; Alber-Laukant, B.: *Finite Elemente Analyse für Ingenieure*. 4. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2012
- [12] Rieg, F.: *www.z88.de. Homepage des Finite-Elemente-Systems Z88*. Bayreuth, 2014
- [13] Wehmann, C.; Nützel, F.; Rieg, F.: *Auslegung von Dehnschrauben bei plastischem Materialverhalten unter Einsatz der Finite Elemente Analyse*. 10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2012, Dresden, 14. Juni 2012, S. 315-331, 2012
- [14] C. Wehmann: *Nichtlineare Finite-Elemente-Analyse für Berechnungen im Maschinenbau. Geometrische Nichtlinearitäten und plastisches Materialverhalten ausgewählter Maschinenelemente*. Dissertation Universität Bayreuth, Shaker Verlag, Aachen, ISBN 978-3-8440-3063-1, 2014
- [15] Lebedev, A. A.; Kosarchuk, V. V.: *Influence of phase transformations on the mechanical properties of austenitic stainless steels*. International Journal of Plasticity, Bd. 16, S. 749-767, 2000



# FEM-Untersuchung zur Durchdringungskerbwirkung beim Zusammentreffen von Umlaufnut und Querbohrung in Wellen

Ali Daryusi, Alexander Roller, Sebastian Jung

Professur für Maschinenelemente und CAD/CAE-Labor, Hochschule Offenburg

Badstraße 24, 77652 Offenburg

E-Mail: ali.daryusi@hs-offenburg.de, sebastian.jung@hs-offenburg.de

Internet: <http://www.hs-offenburg.de/cax/>

**Inhalt:** Der hier vorliegende Beitrag beschreibt erste Untersuchungsergebnisse mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Kerbspannungsanalyse an Durchdringungskerben bei Getriebewellen. Es handelt sich dabei um eine Umlaufnut sowie einen Wellenabsatz mit jeweils überlagerter Querbohrung. In beiden Fällen wird die Bohrung im Bereich der maximalen Spannungskonzentration der Umlaufnut bzw. des Wellenabsatzes angebracht. Entsprechende Formzahl diagramme werden angegeben und neue Näherungsgleichungen für eine genauere Formzahlberechnung je nach Belastungsart Torsion, Biegung und Zug/Druck aufgestellt. Die neu gewonnenen FEM-Ergebnisse erweitern die qualitativen und quantitativen Erkenntnisse über die in der Literatur vorhandenen Berechnungsverfahren und werden als Grundlage für weitere Untersuchungen zu dem bislang wenig erforschten Thema „räumliche Durchdringungskerbwirkung“ und deren Entlastung verwendet.

**Abstract:** The present paper describes the first research results with the finite element method (FEM) to the notch stress analysis of multiple notches in the drive shafts. It involves a circumferential groove in combination with a vertical hole. The second notch shape is a combination of a vertical hole in a shaft shoulder. In both cases, the hole is provided in the region of maximum stress concentration or the peripheral groove of the shaft shoulder. The stress concentration factors are shown in diagrams. New approximate equations are set up for an accurate estimate of the stress concentration factors depending on the types of loads torsion, bending and tension/compression. The newfound FEM-results extend the qualitative and quantitative insights on the calculation methods in the existing literature about the calculation of the load bearing capacity of notched components. These results are used as the basis for further numerical investigations on the hitherto little-explored topic of "three-dimensional multiple notch effect" as well as to reduce the resulting stress concentrations.

**Stichwörter:** Mehrfachkerbwirkung, Formzahlen, Umlaufnut, Querbohrung, FEM.

**Keywords:** multiple notch-effective, stress concentration factors, circumferential groove, cross hole, FEM.

## 1 Einleitung

Räumliche Durchdringungskerven sind dadurch gekennzeichnet, dass eine Kerbe eine andere Kerbe in Richtung ihres größten Spannungsgefälles durchdringt. Sie liegen so ineinander, dass ihre Störungsbereiche überschneiden und ihre Kerbwirkungen überlagern, [1] und [2]. Solche Kerben sind eine im Maschinenbau verhältnismäßig häufig vorkommende Form mehrfacher Kerbwirkung. Ein Beispiel dafür stellt eine Umlaufnut mit im Kerbgrund überlagerter Querbohrung an Wellen dar. Hier liegen wesentlich komplexere Verhältnisse zwischen Formzahl und Geometrie als bei Einzelkerben vor und sind hohe Beanspruchungen zu erwarten.

Die Vergrößerung der Spannungsspitze einer konstruktivbedingten Einzelkerbe erfolgt hier durch die Kerbwirkung der Zusatzkerbe, die die Einzelkerbe durchdringt. Diese örtliche starke Steigerung der Spannungskonzentrationen vermindert die Festigkeit und Lebensdauer von dynamisch beanspruchten Bauteilen. Die genaue Kenntnis des Einflusses der Kerbwirkung und deren Minderung bildet eine gute Grundlage für eine treffsichere Festigkeitsberechnung und ermöglicht das gewichtsoptimierte Konstruieren. Die Berechnung der Kerbspannungen und die notwendige Entwicklung entsprechender Näherungsformeln für die Formzahlbestimmung an Durchdringungskerven stellen eine besondere Herausforderung dar. In der Fachliteratur liegen bisher kaum systematische Untersuchungen an Durchdringungskerven vor.

Estes Ansätze sind auf [3] und [1] zurückzuführen. Thum und Svenson [1] entwickelten ein Näherungsverfahren zur Ermittlung der Formzahl für den Fall einer Kerbüberlagerung am Beispiel der Halbkreisnut mit Querloch an einem zugbelasteten Stab. Sie nahmen die maximale Spannung der Umlaufnut als Nennspannung für die Bohrung an, und konnten so die Formzahl der Durchdringungskerbe durch Multiplikation der beiden einzelnen Formzahlen berechnen. In vielen Lehrbüchern findet dieses Verfahren Anwendung. Ähnliche oder leicht modifizierte Näherungen werden in weiteren Literaturquellen (z.B. [4] und [5]) aufgeführt. Jedoch stellen diese Ansätze und die sich daraus ergebenden Ergebnisse für den heutigen Entwicklungsstand eine mit zu großen Abweichungen behaftete Näherungshypothese dar. Untersuchungen [6] ergaben, dass die Berechnung nach [1] Lücken aufweist und nur bei bestimmten geometrischen Verhältnissen funktioniert. Aus heutiger Sicht erscheint die Eignung der aus diesem und anderen Verfahren erreichten Ergebnisse als dringend überprüfungswürdig.

## 2 Untersuchungsspektrum

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung von Näherungsgleichungen zur Berechnung der Spannungsformzahlen  $\alpha$  [7] für die Wellen mit Durchdringungskerben für die Belastungsarten Zug/Druck, Biegung und Torsion. Es handelt sich dabei zum einen um die Kerbüberlagerung einer umlaufenden Halbkreisnut in Kombination mit überlagerter Querbohrung (WmUQ) (Abb. 1), und zum anderen um eine Querbohrung im Kerbgrund eines Wellenabsatzes (WmAQ) (Abb. 2). Prinzipiell ist die Absatzwelle mit Bohrung bei der Ausnutzung der Symmetrie eine halbe Welle mit Umlaufnut und Bohrung. Hierbei wurde die Bohrung so angebracht, dass diese durch den Mittelpunkt des Absatzradius bzw. des Nutradius geht. In der Abb. 1 und Abb. 2 sind die Untersuchungsgegenstände dargestellt.

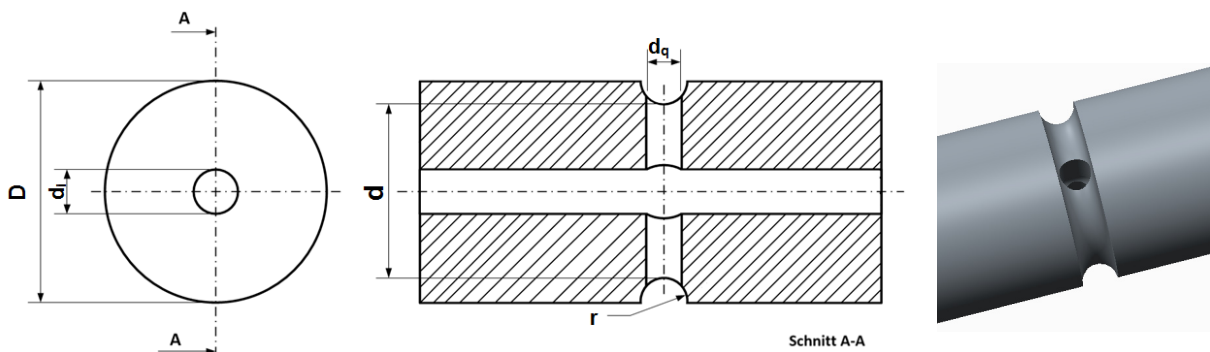


Abbildung 1: Bezeichnungen der Kerbform WmUQ (Welle mit Umlaufnut & Querbohrung)

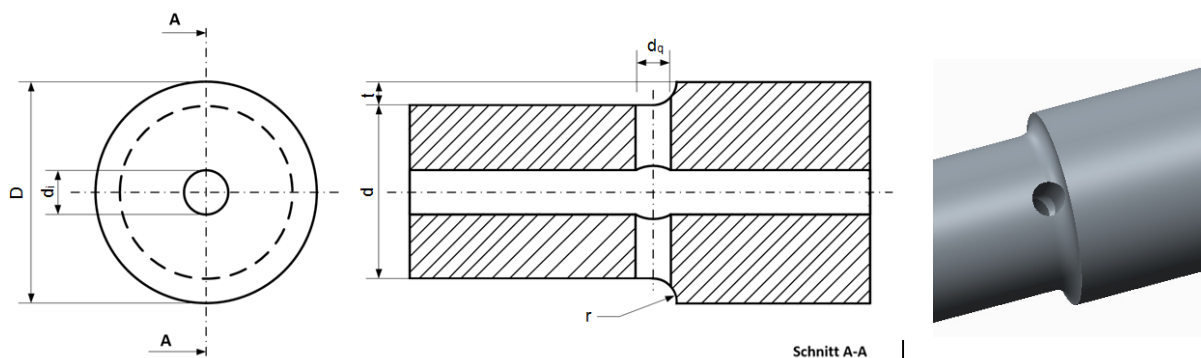


Abbildung 2: Bezeichnungen der Kerbform WmAQ (Welle mit Absatz & Querbohrung)

Um die mehrparametrische Formzahlabhängigkeit einzugrenzen, werden die folgenden geometrischen Randbedingungen für die beiden Kerbformen eingehalten: Innendurchmesser Verhältnis  $d_i/D = 0,2$ ; Kerbschärfe  $r/t = 1$ ; Querbohrungsdurchmesser Verhältnis  $0,02 \leq d_q/D \leq 0,6$  und Durchmesser Verhältnis  $0,4 \leq d/D \leq 0,9$ .

### 3 Hinweise für die Auswertung und Nennspannungsberechnung

Die Veränderung der geometrischen Kerbverhältnisse wurde in sinnvollen Bereichen festgelegt, um praxisnahe Ergebnisse zu erhalten. Um die Untersuchung zu vervollständigen, wurden auch die kritischen Randbereiche betrachtet, welche in der Praxis jedoch eher selten auftreten.

Die numerischen Untersuchungen zu den oben genannten Kerbkombinationen wurden mit der Software PTC Simulate 2.0 durchgeführt, [8]. Die auf die Welle einwirkenden Kräfte und Momente entsprachen den drei Belastungen Zug/Druck, Torsion und Biegung.

Die zugrunde gelegte Nennspannung für die Formzahlbestimmung wurde stets auf den geringsten gefährdeten Querschnitt bezogen. Für die Berechnung des Flächeninhalts und der Widerstandsmomente bei Biegung oder bei Torsion beider Kerbgeometrien wurden neue Gleichungen entwickelt, (Abb. 3). Diese Vorgehensweise ist erforderlich, um auch für große Querbohrungsdurchmesser exakte Ergebnisse der Formzahl zu erzielen, auch wenn diese in der Realität nicht vorkommen. Die Werte aus den Formeln haben eine Abweichung von 0,01 % zu den vom CAD Programm vorgeschlagenen Werten. Dadurch konnte der Fehler bei der Berechnung der Formzahl minimiert werden.

Um eine Einschätzung der Genauigkeit der mit dieser Software gewonnenen Ergebnisse zu ermöglichen, wurden Konvergenzuntersuchungen durchgeführt. Dabei wurden die FE-Ergebnisse an Wellen mit Umlaufnut oder mit Querbohrung mit den berechneten Formzahlen aus den Näherungen nach DIN 743-2 [7] verglichen. Diese Untersuchung ergab eine gute Übereinstimmung. Die prozentuale Abweichung ist kleiner als 3%.

Die Auswertung der Kerbspannungen bzw. der Formzahlen geschah sowohl nach der Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH) als auch nach der Normalspannungshypothese (NSH). Die Verwendung der größten Hauptspannung  $\sigma_1$  nach der NSH wird aber favorisiert, um auf der sicheren Seite zu liegen, [7]. Zwischen den berechneten Spannungsfornzahlen nach der NSH und der GEH für die beiden Kerbkombinationen (WmUQ) und (WmAQ) gelten die folgenden Beziehungen (1) und (2):

$$\text{Zug/Druck oder Biegung} \quad \alpha_{\sigma,zd,b\_GEH} \approx (0,97 \text{ bis } 1) \cdot \alpha_{\sigma,zd,b\_NSH} \quad (1)$$

$$\text{Torsion} \quad \alpha_{\tau,t\_GEH} \approx \frac{\alpha_{\tau,t\_NSH}}{\sqrt{3}} \approx (0,54 \text{ bis } 0,58) \cdot \alpha_{\tau,t\_NSH} \quad (2)$$

| Querschnittsfläche für Zug/Druck |  |
|----------------------------------|--|
| Für $d_q < d_i$                  | $A = \frac{d^2 \pi}{4} - 2 \left[ \frac{d_i^2}{8} \cdot \left( 2 \cdot \cos^{-1} \left( \frac{d_q}{d_i} \right) - \sin \left( 2 \cos^{-1} \left( \frac{d_q}{d_i} \right) \right) \right) + \frac{d^2}{8} \cdot \left( 2 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) - \sin \left( 2 \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) \right) \right) \right] - \sqrt{d^2 - d_q^2} \cdot d_q$  |
| Für $d_q > d_i$                  | $A = \frac{d^2 \pi}{4} - 2 \left[ \frac{d^2}{8} \cdot \left( 2 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) - \sin \left( 2 \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) \right) \right) \right] - \sqrt{d^2 - d_q^2} \cdot d_q$   |
| Widerstandsmoment für Biegung    |  |
| Für $d_q < d_i$                  | $W_b = \frac{d^4 \pi}{64} - 2 \left[ \frac{d_i^4}{768} \cdot \left\{ 12 \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d_i} \right) \right) - 8 \cdot \sin \left( 2 \left( \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d_i} \right) \right) \right) + \sin \left( 4 \left( \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d_i} \right) \right) \right) \right\} + \frac{d^4}{4} \cdot \left\{ \frac{4 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) - \sin \left( 4 \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) \right)}{16} - \frac{8}{9} \cdot \frac{\left( \frac{d_q}{d} \right)^6}{2 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) - \sin \left( 2 \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) \right)} \right\} + \frac{\sqrt{d^2 - d_q^2} \cdot d_q}{d} + \left( 2 \cdot d \cdot \frac{\left( \frac{d_q}{d} \right)^3}{3 \left( 2 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) - \sin \left( 2 \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) \right) \right)} \right)^2 \cdot \left( \frac{d^2}{8} \left( 2 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) - \sin \left( 2 \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) \right) \right) \right) \right]$ |
| Für $d_q > d_i$                  | $W_b = \frac{d^4 \pi}{64} - 2 \left[ \frac{d^4}{4} \cdot \left\{ \frac{4 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) - \sin \left( 4 \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) \right)}{16} - \frac{8}{9} \cdot \frac{\left( \frac{d_q}{d} \right)^6}{2 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) - \sin \left( 2 \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) \right)} \right\} + \frac{\sqrt{d^2 - d_q^2} \cdot d_q}{d} + \left( 2 \cdot d \cdot \frac{\left( \frac{d_q}{d} \right)^3}{3 \left( 2 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) - \sin \left( 2 \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) \right) \right)} \right)^2 \cdot \left( \frac{d^2}{8} \left( 2 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) - \sin \left( 2 \sin^{-1} \left( \frac{d_q}{d} \right) \right) \right) \right) \right]$   |
| Widerstandsmoment für Torsion    |  |
| $W_t = W_b \cdot 2$              |  |

Abbildung 3: Gleichungen zur Berechnung der Querschnittsfläche für Zug/Druck bzw. der Widerstandsmomente bei Biegung oder Torsion bei Hohlwellen mit Umlaufnut und überlagerter Querbohrung

## 4 Numerische Untersuchungsergebnisse

In der Abbildung 4 (Abschnitte 4.1) und in der Abbildung 5 (Abschnitte 4.3) sind die Kurvenscharen der Formzahlen beider untersuchten Geometrien bei Zug/Druck, Biegung und Torsion als Funktion vom Verhältnis  $d_q/D$  (Bohrungs- zum Wellenaußendurchmesser) und in Abhängigkeit vom Durchmesser Verhältnis  $d/D$  aufgetragen.

Vorgehensweise zur Entwicklung von Näherungsformeln:

Aus den numerischen Untersuchungsergebnissen wurden neue Näherungsgleichungen zur Berechnung der Formzahlen entwickelt. Dabei wurden die mit der FEM bestimmten Formzahlen zuerst über das Verhältnis  $(d_q/d)^{1/2}$  in Abhängigkeit vom Verhältnis  $d/D$  dargestellt. Bei der Auswertung der Zug/Druck-Formzahlverläufe war es möglich, für jede der gezeichneten Funktionen  $d/D = \text{Konst.}$  ein Polynom 3. Grades mit den jeweils sieben errechneten Werten als Stützstellen anzugeben. Das Polynom hat die Form gemäß Gl. (3). Die Koeffizienten  $A_1, B_1, C_1, E_1$  lassen sich für 5 Durchmesser Verhältnisse  $d/D$  leicht ermitteln. Jeder Koeffizient ist wieder durch ein Polynom 3. Grades nach Gl. (3) darstellbar.

$$\alpha_{\sigma, zd\_WUQ} = A_1 \cdot \left(\frac{d_q}{d}\right)^{\frac{3}{2}} + B_1 \cdot \left(\frac{d_q}{d}\right) + C_1 \cdot \left(\sqrt{\frac{d_q}{d}}\right) + E_1 \quad (3)$$

$$A_1, B_1, C_1, E_1 = |k_1| \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 + |k_2| \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 + |k_3| \cdot \left(\frac{d}{D}\right) + |k_4| \quad (4)$$

Bei einem X-Achsenwert von  $(d_q/d)^{1/2}$  entsteht bei Biegung ein fast linearer Formzahlverlauf. Bei Torsion wurde ein Polynom zweiten Grades gewählt, um die Kurvenscharren der FEM-Formzahlen bestimmen zu können.

Die Formzahlen lassen sich unter den gegebenen Randbedingungen mit den Beziehungen 5, 6 und 7 (Abschnitte 4.2) für die Kerbkombination (WmUQ) bzw. mit 8, 9 und 10 (Abschnitte 4.4) für die Kerbform (WmAQ) je Belastungsart berechnen.

Der Vergleich der Formzahlen aus den Näherungsformeln und denen aus der FEM ergab eine prozentuale Abweichung von maximal 5%. Große Abweichungen von ca. 8% kommen nur dann vor, wenn die Querbohrungen sehr groß ausfallen und bei einem Verhältnis von  $d/D = 0,9$ . Diese sind jedoch zu vernachlässigen, weil eine derartige Konstruktion in der Praxis nicht vorkommt. In dazugehörigen Schaubildern der Formzahlen ist das Verhältnis  $d/D = 0,9$  nicht aufgeführt.

#### 4.1 Formzahldarstellung an Wellen mit Umlaufnut und Querbohrung (WmUQ)

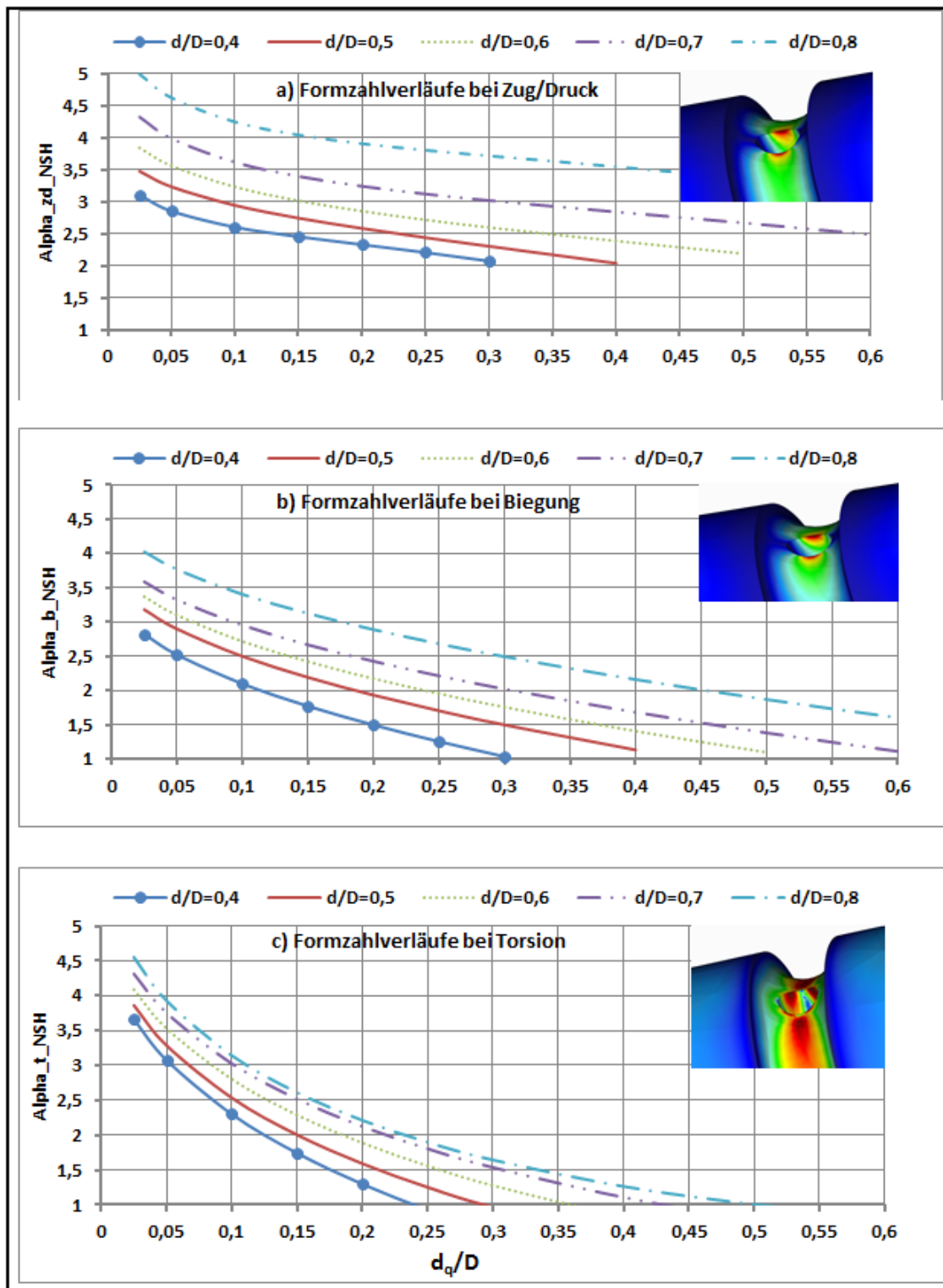


Abbildung 4: Darstellung der Formzahlverläufe nach der NSH für Welle mit einer Halbkreisnut und überlagelter Querbohrung (WmUQ), in Abhängigkeit vom Bohrungsdurchmesser Verhältnis  $d_q/D$  und Wellendurchmesser Verhältnis  $d/D$ , a) bei Zug/Druck, b) bei Biegung und c) bei Torsion

## 4.2 Formzahlberechnung an Wellen mit Umlaufnut und Querbohrung (WmUQ)

Gültigkeitsbereich:  $d_i/D = 0,2$ ;  $r/t = 1$ ;  $0,02 \leq d_q/D \leq 0,6$  und  $0,4 \leq d/D \leq 0,9$ .

Näherungsformel bei Zug/Druck

$$\alpha_{\sigma,zd\_WUQ} = A_1 \cdot \left(\frac{d_q}{d}\right)^{\frac{3}{2}} + B_1 \cdot \left(\frac{d_q}{d}\right) + C_1 \cdot \left(\sqrt{\frac{d_q}{d}}\right) + E_1 \quad (5)$$

$$A_1 = -95,07 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 + 103,54 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) - 30$$

$$B_1 = -199,6 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 + 511,15 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 372 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) + 86,9$$

$$C_1 = 196 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 - 419 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 + 272,5 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) - 60,12$$

$$E_1 = -18,78 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 + 46,8 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 29,6 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) + 9,7$$

Näherungsformel bei Biegung

$$\alpha_{\sigma,b\_WUQ} = A_2 \cdot \sqrt{\frac{d_q}{d}} + B_2 \quad (6)$$

$$A_2 = -1,533 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) - 2,283$$

$$B_2 = 31,76 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 - 55,4 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 + 33,63 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) - 3,075$$

Näherungsformel bei Torsion

$$\alpha_{\tau,t\_WUQ} = A_3 \cdot \frac{d_q}{d} + B_3 \cdot \sqrt{\frac{d_q}{d}} + C_3 \quad (7)$$

$$A_3 = 143 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 - 237,4 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 + 134 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) - 23,5$$

$$B_3 = -146,8 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 + 244,63 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 139,6 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) + 19,7$$

$$C_3 = 20,43 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 - 32,76 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 + 19,15 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) + 1,46$$



### 4.3 Formzahldarstellung an Wellen mit Absatz und Querbohrung (WmAQ)

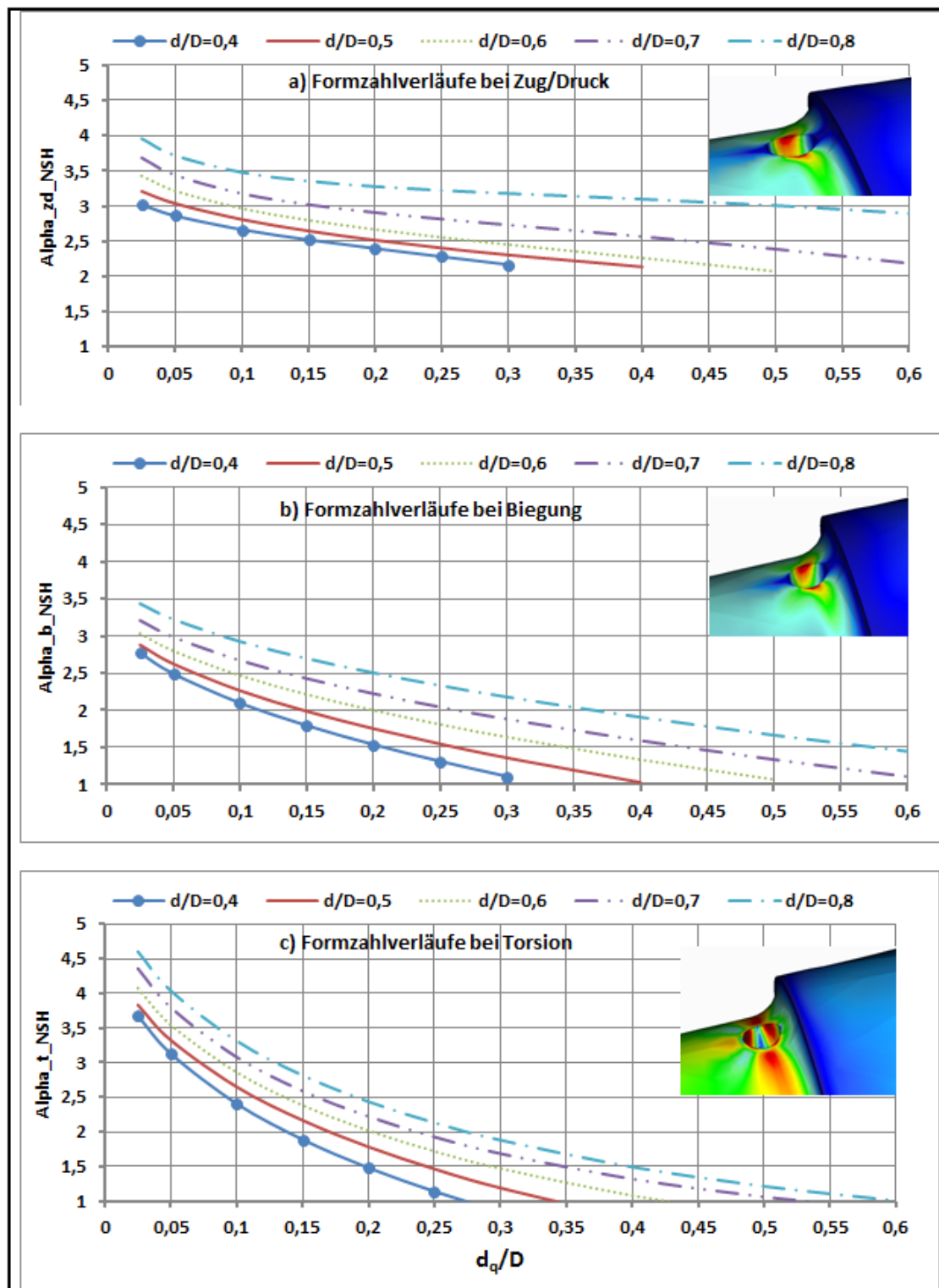


Abbildung 5: Darstellung der Formzahlverläufe nach NSH für Welle mit einem Absatz und überlagelter Querbohrung (WmAQ), in Abhängigkeit vom Bohrungsdurchmesserverhältnis  $d_q/D$  und Wellendurchmesserverhältnis  $d/D$ , a) bei Zug/Druck, b) bei Biegung und c) bei Torsion

#### 4.4 Formzahlberechnung an Wellen mit Absatz und Querbohrung (WmAQ)

Gültigkeitsbereich:  $d_i/D = 0,2$ ;  $r/t = 1$ ;  $0,02 \leq d_q/D \leq 0,6$  und  $0,4 \leq d/D \leq 0,9$ .

Näherungsformel bei Zug/Druck

$$\alpha_{\sigma, zd\_WAQ} = a_1 \cdot \left(\frac{d_q}{d}\right)^{\frac{3}{2}} + b_1 \cdot \left(\frac{d_q}{d}\right) + c_1 \cdot \left(\sqrt{\frac{d_q}{d}}\right) + e_1 \quad (8)$$

$$a_1 = 315,25 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 - 595,3 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 + 351 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) - 66,4$$

$$b_1 = -466,4 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 + 886,7 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 522,7 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) + 98,7$$

$$c_1 = 244,6 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 - 452 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 + 257,7 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) - 48,65$$

$$e_1 = -33,74 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 + 62,6 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 33,9 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) + 9,2$$

Näherungsformel bei Biegung

$$\alpha_{\sigma, b\_WAQ} = a_2 \cdot \sqrt{\frac{d_q}{d}} + b_2 \quad (9)$$

$$a_2 = 100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^4 - 240,2 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 + 211,9 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 81,7 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) + 8,9$$

$$b_2 = 2,43 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 1,7 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) + 3,73$$

Näherungsformel bei Torsion

$$\alpha_{\tau, t\_WAQ} = a_3 \cdot \frac{d_q}{d} + b_3 \cdot \sqrt{\frac{d_q}{d}} + c_3 \quad (10)$$

$$a_3 = -140,2 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 + 254,7 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 141,8 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) + 26,3$$

$$b_3 = 146,3 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 - 268,85 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 + 150,34 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) - 32,6$$

$$c_3 = -36,1 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 + 68,1 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 38,7 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) + 12$$

## 5 Zusammenfassung

Im Maschinenbau ist der Trend hin zur Miniaturisierung, zu immer kompakteren und auch mechatronischen Konzepten zu beobachten. Für die mechanische Kraftübertragung bedeutet dies zunehmend höhere Drehmomentdichten bei möglichst höheren Wirkungsgraden. Diese gesteigerten Anforderungen betreffen letztlich auch die hier betrachteten stark gekerbten Getriebewellen.

Während die Formzahlberechnung von typischen Einzelkerben (z.B. Welle mit einem Absatz, einer Umlaufkerbe oder einer Bohrung) mittels Näherungsgleichungen nach den bekannten Tragfähigkeitsberechnungsverfahren [5] oder [7] erfolgen kann, sind die Berechnungsvorschriften für die Ermittlung der Kerbwirkung an mehrfach gekerbten Wellen nur unvollkommen erfasst.

Dies ist ein Mangel bzw. ein Sicherheitsrisiko besonders für kleinere und mittlere Unternehmen (KMU), die nicht in der Lage sind, Berechnungsmethoden wie BEM (Boundary Element Methode) oder die Finite Element Methode (FEM) anzuwenden.

In dieser Arbeit wurden FEM-Untersuchungen zur Bestimmung der stetigen Änderung der Formzahlen in Abhängigkeit von der Geometrie bei Getriebewellen mit Durchdringungskerben „Umlaufnut mit überlagertem Querloch“ sowie „Absatz mit überlagertem Querloch“ durchgeführt.

Aus den numerischen Ergebnissen wurden geeignete Näherungsformeln zur Formzahlabeschätzung bei Zug/Druck, Biegung und Torsion entwickelt.

Die neu gefundenen Erkenntnisse zu diesem Themengebiet sollen zur Weiterentwicklung des Standes der Technik hinsichtlich der wirtschaftlichen Gestaltung und der treffsicheren Festigkeitsberechnung der hochbeanspruchten Wellen mit Durchdringungskerben beitragen.

Besonderer Dank gebührt dem Koautor Alexander Roller, der sich in seiner Bachelorarbeit im WS 2013/2014 an der HS Offenburg unter der Betreuung von Prof. Dr.-Ing. Ali Daryusi mit dem Thema „FEM-Formzahlberechnung an Wellen mit Umlaufnut und überlagter Querbohrung“ befasst hat.

## 6 Ausblick

Da die Formzahlwerte in der vorliegenden Arbeit für den Fall einer konstanten Kerbschärfe  $r/t = 1$  gelten, werden auf deren Basis weitere Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses der Variation der Kerbschärfe für den geometrischen Bereich  $0,03 \leq r/t \leq 2$  realisiert.

Während die Entlastung der Spannungskonzentrationen an Einzelkerben schon öfter sowohl experimentell als auch numerisch untersucht wurde, liegen bisher kaum Untersuchungen zur Entlastung von den hochbeanspruchten Durchdringungskerben vor. Im Rahmen weiterer Arbeiten wird diese Fragestellung auch ein Untersuchungsschwerpunkt sein. Eine Möglichkeit zur Verringerung der Kerbwirkung dieser Kerbfälle besteht in der beabsichtigten Anbringung von einer Zusatznut in Längsrichtung, welche sich mit der halbkreisförmigen Hauptnut in Querrichtung kreuzt. Diese Entlastungsnut ermöglicht Spannungsreduktionen bis zu ca. 25%.

## 7 Literatur

- [1] Thum, August; Svenson, Otto: *Beanspruchung bei mehrfacher Kerbwirkung. Entlastungs- und Überlastungskerven*. Schweizer Archiv, Angew. Wiss. Technik 15. (1949), Nr. 6, S. 161–174
- [2] Puchner, O.; Kamensky, A.: *Spannungskonzentration und Kerbwirkung von Kerben im Kerbrand*. Konstruktion 24 (1972) Heft 4, S. 127-134
- [3] Herold, Wilfried: *Die Wechselfestigkeit metallischer Werkstoffe. Ihre Bestimmung und Anwendung*. Wien: Verlag von Julius Springer 1934. – ISBN 978-3-7091-5920-0
- [4] Vagapov, P. D.; Sisorina, O. I.: *Effekt nalozenija koncentraciji naprjazenij pri dejstvjii peremennyh nagruzok. (Titel ist übersetzt) Die Auswirkung von überlagerten Spannungskonzentrationen bei schwingender Beanspruchung*. Moskau: Izd. Ak. Nauk SSSR (1959), S. 36/51
- [5] FKM-Richtlinie. *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen*. Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), Frankfurt/Main: VDMA-Verlag, 4. Erweiterte Ausgabe, 2002. – ISBN 3-8163-0424-9
- [6] Daryusi, Ali; Jung, Sebastian: *FEM-Berechnung der Formzahlen von Durchdringungskerben nach dem Thum'schen Verfahren*. Interner Bericht, HS Offenburg, 2013, unveröffentlicht
- [7] DIN 743-2. *Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen, Teil 2: Formzahlen und Kerbwirkungszahlen*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Beuth Verlag, 2012
- [8] Parametric Technology Corporation: *Creo Parametric 2,0 Simulate*. 2012

# Entwicklung und Berechnung gewichtsoptimierter Platten aus faserverstärkten Kunststoffen

Felix Baudach, Ines Barz, Frank Engelmann, Thomas Guthmann

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

University of Applied Sciences

Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

E-Mail: felix.baudach@fh-jena.de; Internet: <http://www.fh-jena.de>

**Inhalt:** Besonderheiten bei der Optimierung von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen werden genannt und erläutert. Ein Optimierungsverfahren wird genannt und am Beispiel einer fest eingespannten, druckbelasteten Platte angewendet.

**Abstract:** Special features in the optimization of components made of fiber-reinforced plastics are mentioned and explained. A method is presented and the optimization of a firmly clamped pressure loaded plate is demonstrated.

**Stichwörter:** FKV, FEM, Optimierung.

**Keywords:** FRP, FEM, Optimization.

## 1 Einleitung

Schwindende Rohstoffvorräte und steigende Energiepreise führen zu einem wachsenden Bewusstsein für Ressourceneffizienz und zwingen Hersteller verbrauchsarme Konstruktionen zu entwickeln. Eine Möglichkeit, den Energiebedarf zu senken, bildet die Gewichtsreduktion durch konsequenten Leichtbau und die Substitution meist metallischer Materialien durch Werkstoffe mit, auf ihre Dichte bezogen, hohen mechanischen Eigenschaften. Faserverstärkte Kunststoffe haben dabei in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Wurde die Entwicklung bisher hauptsächlich aus dem Bereich der Luft- und Raumfahrt geprägt, ist durch die steigende Nachfrage aus der Automobilbaubranche und für den Bau leistungstärkerer Windkraftanlagen mit einer weiter steigenden Akzeptanz und höheren Produktionszahlen des Verbundwerkstoffes zu rechnen [1].

Die Möglichkeiten, welche sich durch die gerichtete Ablage von den Fasern ergeben, bieten sowohl die Chance Bauteile in Belastungsrichtung gezielt verstärken zu können, als auch die Herausforderung sich der Berechnung von anisotropen Werkstoffen stellen zu müssen. Aufbau und Berechnung von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) unterscheiden

sich grundlegend von metallischen Werkstoffen. Bauteile aus FKV bestehen üblicherweise aus in Kunststoff getränkten Fasergelegen, welche schichtweise übereinander, der Bau-teilkontur folgend, angeordnet werden. Dies führt, sowohl in Faserebene als auch senkrecht dazu, zur Anisotropie der mechanische Eigenschaften. Für die Berechnung ist es daher wichtig, die Belastungsrichtung in Bezug auf die Faserorientierung genau zu kennen.

Im Gegensatz zu metallischen Materialien ist darüber hinaus noch eine Unterscheidung zwischen Druck- und Zugbelastung zu treffen, da faserverstärkte Kunststoffe für diese Belastungsarten unterschiedliche Festigkeiten besitzen. So muss der Konstrukteur neben Parametern, wie Faserorientierung, Faservolumengehalt und Auswahl der einzelnen Verbundstoffe, auch andere Versagens- bzw. Bruchkriterien beachten. Selbst die Berechnung einfacher Bauteile mit symmetrischen Aufbauten gestaltet sich dementsprechend kompliziert und umfangreich. Daher ist der Einsatz computergestützter Berechnungsmethoden aus dem Produktentwicklungsprozess nicht mehr wegzudenken.

## **2 Berechnung faserverstärkter Kunststoffe**

Komplexere Geometrien oder Belastungen führen dazu, dass sich Spannungen im Materialverbund nicht mehr mithilfe der klassischen Laminat Theorie (CLT) berechnen lassen. Spätestens ab hier ist die Verwendung spezieller analytischer Lösungen oder der Einsatz der finiten Elemente Methode (FEM) notwendig. Da nur für wenige Spezialfälle unter fest vorgeschriebenen Randbedingungen analytische Lösungen existieren, hat die Berechnung mittels FE-Software eine große Bedeutung für die Produktentwicklung.

Für die Anwendung von FE-Programmen zur Berechnung von FKV-Strukturen sind im Allgemeinen folgende Schritte notwendig, wie sie in Abbildung 1 dargestellt sind. Zu Beginn wird eine Geometrie modelliert, welche das zu berechnende Bauteil repräsentieren soll. Anschließend wird dieser Geometrie eine beliebige Anzahl Schichten zugewiesen. Den Schichten ist ein vorher definiertes Material zugeordnet. Den einzelnen Lagen wird eine bestimmte Dicke und ein bestimmter Winkel, welcher die Orientierung der Schicht in einer festgelegten Ebene definiert, zugeordnet. Nach der Wahl der Randbedingungen kann der resultierende Aufbau anschließend berechnet und ausgewertet werden. Für die Auswertung stehen meist verschiedene Versagenskriterien zur Verfügung. Die Kriterien

berücksichtigen die Besonderheiten faserverstärkter Kunststoffe und können in unterschiedlicher Komplexität implementiert werden.

Dieses Vorgehen hat sich bereits etabliert und erleichtert dem Konstrukteur die Auslegung des Bauteils. Ingenieure, die bisher mit klassischen metallischen Werkstoffen gearbeitet haben, neigen aufgrund ihrer fehlenden Erfahrung dazu, das Potential, welches die Verwendung von faserverstärkten Kunststoffen bietet, nicht vollständig auszuschöpfen. Daher kann computergestützte Optimierungssoftware dabei helfen, Bauteile zu entwickeln, welche die Besonderheiten von FKV berücksichtigen und zu einem Design führen, das über die reine Substitution des Ausgangsmaterials hinausgeht.

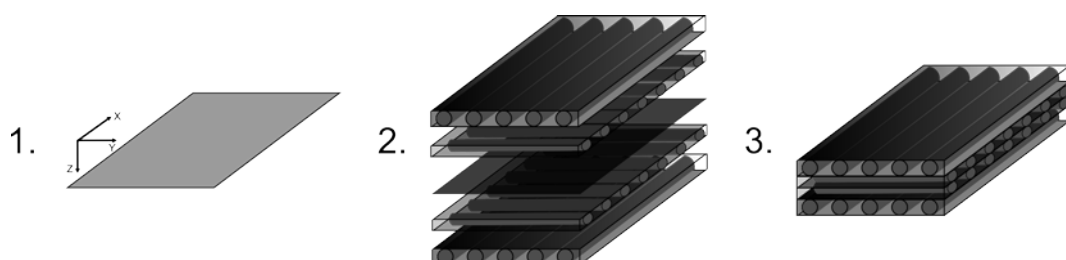


Abbildung 1: Vorgehen bei der Modellierung von FKV

### 3 Optimierung einer Platte aus FKV

#### 3.1 Vorbetrachtung

Für die Gewichtsoptimierung einer durch einen gleichmäßig verteilten Druck belasteten Platte stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Diese umfassen einerseits den Aufbau der einzelnen Schichten und andererseits deren Kombination. Die Orientierung der Fasern, der Faservolumenanteil, die konkrete Wahl der Faser und der Matrix sowie die Dicke sind schichtspezifische Parameter. Die genaue Lage, Anzahl und Reihenfolge der Schichten ergeben den Gesamtaufbau.

Neben Randbedingungen der Optimierung, welche sich aus der Funktion der Platte ergeben, wie zum Beispiel Mindest- oder Maximaldicke, müssen auch fertigungsrelevante Beschränkungen beachtet werden. So kann beispielsweise der Faservolumengehalt nicht frei gewählt werden, sondern unterliegt, je nach Fertigungsverfahren, einer maximalen Obergrenze. Ebenso ist davon auszugehen, dass das Verhältnis von Fasern zu Matrix in allen Schichten ungefähr konstant ist, sofern die Platte in einem Arbeitsschritt gefertigt

wird. Eine schichtweise Variation des Faservolumengehaltes ist fertigungstechnisch daher nur schwer umsetzbar.

Die Schichtdicke ( $t$ ) ist abhängig vom Flächengewicht ( $q$ ) des verwendeten Geleges, der Dichte des Faserwerkstoffes ( $\rho$ ) und dem Faservolumengehalt ( $\varphi$ ) und lässt sich nach Gleichung (1) berechnen.

$$t = \frac{q}{\rho \cdot \varphi} \quad (1)$$

Da das Flächengewicht von Gelegen meist vom Hersteller vorgegeben ist und nicht frei gewählt werden kann, ist die Schichtdicke auch nicht frei wählbar, sondern von den zur Verfügung stehenden Gelegen abhängig, sodass die Dicke nur stufenweise variiert werden kann.

Aufgrund der Vielzahl der zu beachtenden Parameter und der Beachtung spezieller Bruch- und Versagenskriterien (z.B. Tsai-Wu [2], Puck [3]), bedarf es einer großen Erfahrung in der Auslegung von FKV-Bauteilen, um die Vorteile, welche das Material bietet, voll ausnutzen zu können. Eine auf die Auslegung und Berechnung von Faserwerkstoffen spezialisierte FE-Software, welche die oben genannten Besonderheiten in Bezug auf die Herstellung beachtet, kann helfen das Design zu verbessern und den Anforderungen an die Auslegung gerecht zu werden.

### **3.2 Umsetzung mittels der Software OptiStruct**

Die Optimierung von Bauteilen aus FKV erfolgt in drei Schritten. Als Ausgangspunkt wird ein Modell des Bauteiles und des zu optimierenden Lagenaufbaues erstellt, welches alle notwendigen Lasten und Randbedingungen für eine statische FE-Analyse enthält. Die Software wird nur die am Anfang definierten Schichtorientierungen bei der weiteren Berechnung betrachten. Im ersten Schritt wird eine sogenannte „Free Size“-Optimierung durchgeführt. Nach der Definition des Optimierungszieles und der einschränkenden Nebenbedingungen wird dabei die optimale Dicke jeder einzelnen Schicht ermittelt. Dabei ist die Dicke über die Schicht nicht konstant und daher ergibt sich kein fertigungsgerechtes Design. Die Diskretisierung der Schichten zu herstellbaren Lagen konstanter Dicke erfolgt im zweiten Schritt, der „Size“-Optimierung. Abschließend wird beim sogenannten „Shuffling“-Prozess die Reihenfolge der Lagen optimiert.



## 4 Ergebnisse

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der einzelnen Optimierungsschritte am Beispiel einer allseitig fest eingespannten Platte aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff präsentiert werden. Die quadratische Platte mit einem Kantenmaß von 400 mm wird mit einem gleich verteilten Druck von 0,5 MPa belastet. Die für die Simulation verwendeten richtungsabhängigen elastischen Kenngrößen und Festigkeitsparameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Materialparameter

| Material | $E_x$             | $E_y$             | $\nu_{12}$ | $G_{xy}$          | $G_{xz}$          | $G_{yz}$          | $\rho$            | $X_t$             | $X_c$             | $Y_t$             | $Y_c$             | $S$               |
|----------|-------------------|-------------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | -          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | g/cm <sup>3</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |
| CFK      | 121000            | 8600              | 0.27       | 4700              | 4700              | 3100              | 1.49              | 2231              | 1082              | 29                | 100               | 60                |

Grundlage der „Free Size“-Optimierung bildete folgender symmetrischer Lagenaufbau:  $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ . Die Laminatdicke soll zwischen 7,5 mm und 15 mm liegen und die Durchbiegung einen Wert von 4 mm nicht überschreiten. Zusätzlich wurde eine Balance-Bedingung definiert, welche die Dicke der  $\pm 45^\circ$ -Schichten voneinander abhängig macht, sodass beide Schichten gleichverteilt sind. Als Optimierungsziel wurde die Minimierung der Gesamtmasse definiert.

In Abbildung 2 ist die resultierende Materialverteilung über alle acht Schichten dargestellt. Wie in den Nebenbedingungen gefordert, ist das Gesamtlaminat weder dünner als 7,5 mm noch dicker als 15 mm.

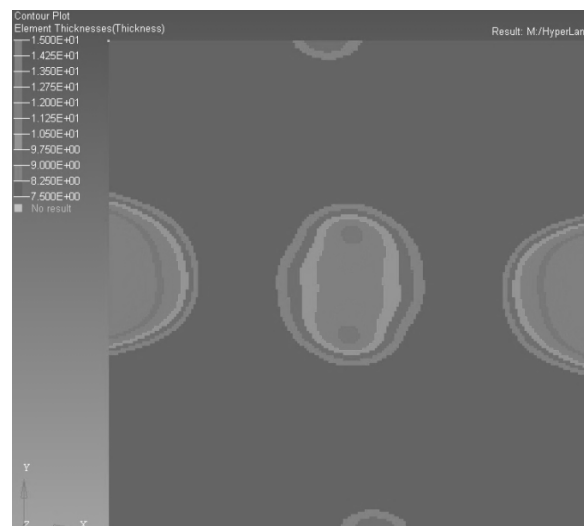


Abbildung 2: resultierende Laminatdicke nach „Free-Size“-Optimierung

Das Gesamtgewicht des Laminates liegt bei nur 1,95 kg, jedoch ist, wie in Abbildung 3 dargestellt, die Dicke einer einzelnen Schicht nicht konstant und daher nicht fertigungsge-  
recht.

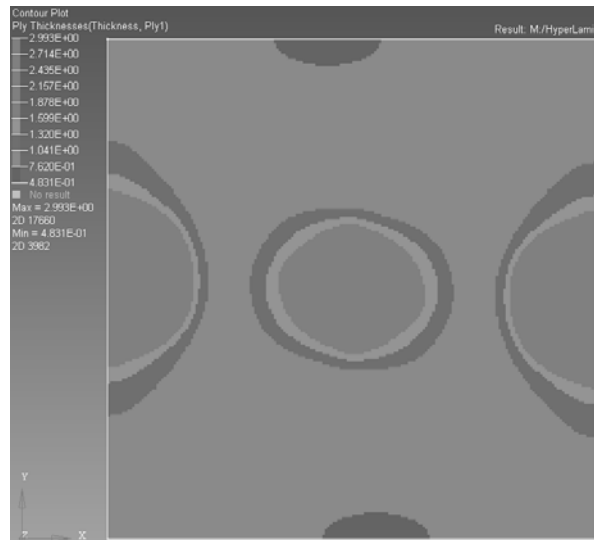


Abbildung 3: Dicke einer 0°-Schicht nach „Free-Size“-Optimierung

Für den folgenden Schritt der „Size“-Optimierung wird als Randbedingung für jede Schicht die fertigbare (konstante) Dicke benötigt. Für das vorliegende Beispiel beträgt der Wert für jede Schicht 0,25 mm.

Neben den schon beschriebenen Nebenbedingungen wurde in dieser Optimierungsphase das TSAI-WU-Versagenskriterium [2] in das Modell implementiert, um die Haltbarkeit des Verbundes sicherzustellen.

Die Auswirkungen der neuen Bedingungen auf das Gesamtlaminat sind in Abbildung 4 und Abbildung 5 erkennbar. Sowohl die Dicke des gesamten Laminates und deren Verteilung als auch die Dicke der einzelnen Lagen ändern sich. Aufgrund der definierten Fertigungsrestriktionen steigt die Gesamtanzahl der simulierten Schichten. Ebenso führen die restriktiveren Materialverteilungsmöglichkeiten und Festigkeitsanforderungen zu einer höheren Plattenmasse von 2,39 kg.

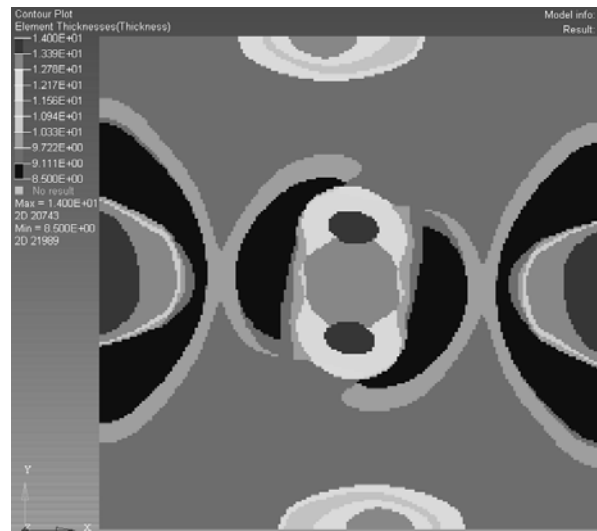


Abbildung 4: resultierende Laminatdicke nach „Size“-Optimierung

Die ausgegebenen Konturen der einzelnen Schichten können mittels computergestützter Anlagen zugeschnitten werden. Durch Integration zusätzlicher Randbedingungen können allerdings auch Schichten generiert werden, welche einfachere Konturen aufweisen, um Kosten in der Fertigung zu sparen. Allerdings führen derartige Vereinfachungen zu einem größeren Plattengewicht.

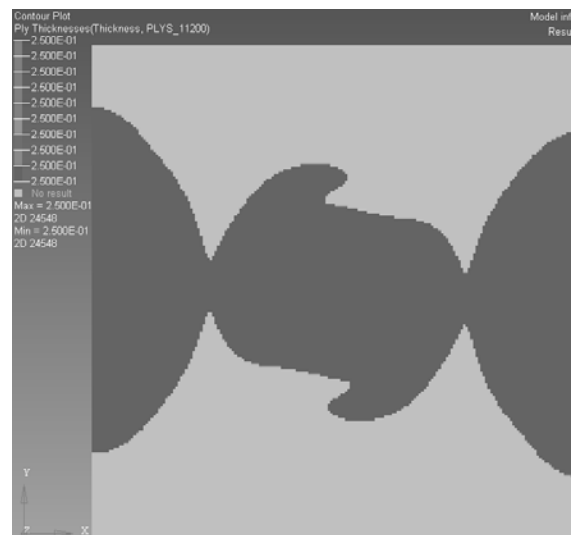


Abbildung 5: Dicke einer ausgewählten 0°-Schicht nach „Size“-Optimierung

Die erfolgreiche Durchführung der „Size“-Optimierung führte zu einem symmetrischen Laminataufbau aus insgesamt 56 Einzellagen.

In der abschließenden Optimierungsphase erfolgte die Variation der Reihenfolge der Einzellagen. Als diesbezüglich zusätzliche Nebenbedingung wurde die maximale Anzahl aufeinanderfolgender Schichten gleicher Orientierung auf vier begrenzt. Zusätzlich wurde festgelegt, dass eine Lage mit einer Faserorientierung von  $+45^\circ$  einer Lage mit  $-45^\circ$  Ausrichtung folgt. Dies ermöglicht die Verwendung von biaxialen Gelegen und vermindert dadurch den Fertigungsaufwand.

In Abbildung 6 ist die Variation der Lagenabfolge über mehrere Iterationsschritte dargestellt. Aufgrund der gewählten Symmetriebedingung ist nur eine Hälfte der Lagen aufgelistet. Durch eine Umschichtung der einzelnen Lagen ändert sich das Gewicht des gesamten Laminates nicht, jedoch kann sich die Steifigkeit der Platte ändern.

| Iteration 0 | Iteration 1 | Iteration 2 | Iteration 3 | Iteration 4 | Legend        |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| 11101       | 12101       | 11401       | 11103       | 11103       | 90.0 degrees  |
| 11102       | 13101       | 11102       | 11401       | 11401       | 45.0 degrees  |
| 11103       | 14101       | 11101       | 11102       | 11102       | 0.0 degrees   |
| 11104       | 14102       | 12101       | 11101       | 11101       | -45.0 degrees |
| 12101       | 11101       | 13101       | 14103       | 14103       |               |
| 12102       | 14103       | 14103       | 14104       | 14104       |               |
| 13101       | 14104       | 14104       | 14105       | 14105       |               |
| 13102       | 11102       | 14105       | 14106       | 14106       |               |
| 14101       | 14105       | 14106       | 12101       | 12101       |               |
| 14102       | 14106       | 11103       | 13101       | 13101       |               |
| 14103       | 12102       | 14107       | 14107       | 14107       |               |
| 14104       | 13102       | 14108       | 14108       | 14108       |               |
| 14105       | 11103       | 14201       | 14201       | 14201       |               |
| 14106       | 14107       | 14301       | 14301       | 14301       |               |
| 14107       | 14108       | 12201       | 12201       | 12201       |               |
| 14108       | 11104       | 13201       | 13201       | 13201       |               |
| 11201       | 14201       | 11104       | 14302       | 14302       |               |
| 12201       | 14301       | 14302       | 14303       | 14303       |               |
| 13201       | 11201       | 14303       | 14102       | 14102       |               |
| 14201       | 12201       | 14102       | 14101       | 14101       |               |
| 14301       | 13201       | 14101       | 12102       | 12102       |               |
| 14302       | 14302       | 12102       | 13102       | 13102       |               |
| 14303       | 14303       | 13102       | 14304       | 14304       |               |
| 14304       | 11401       | 14304       | 14305       | 14305       |               |
| 14305       | 14304       | 14305       | 14401       | 14401       |               |
| 11401       | 14305       | 14401       | 14402       | 14402       |               |
| 14401       | 14401       | 14402       | 11104       | 11104       |               |
| 14402       | 14402       | 11201       | 11201       | 11201       |               |

Abbildung 6: Iterationen des Lagenaufbaus

Abschließend sind in Tabelle 2 ausgewählte Designparameter über den dargestellten Optimierungsablauf zusammengefasst und werden mit Werten einer ebenfalls optimierten Platte aus Aluminium, welche den gleichen mechanischen Randbedingungen unterlag, verglichen.

Gegenüber der Aluminiumplatte konnte das Gewicht der verstärkten Kunststoffplatte um rund 35% reduziert werden.

Tabelle 2: Ergebnisvergleich

|                             |    | Aluminiumplatte                | Platte aus CFK                   |                             |                     |
|-----------------------------|----|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------------------|
|                             |    | nach Parameter-<br>optimierung | nach „Free-Size“-<br>Optimierung | nach „Size“-<br>Optimierung | nach<br>„Shuffling“ |
| Gewicht                     | kg | 3,68                           | 1,95                             | 2,39                        | 2,39                |
| max. Durchbiegung           | mm | 1,12                           | 3,97                             | 3,00                        | 2,92                |
| maximale Plattendicke       | mm | 30,00                          | 15,00                            | 14,00                       | 14,00               |
| Versagenskrit. nach Tsai-Wu |    | -                              | 1,859                            | 0,863                       | 0,843               |

## 5 Zusammenfassung

Mithilfe computergestützter Simulations- und Rechentechnik und entsprechender Software ist es möglich Bauteile aus FKV zu optimieren. Auf spezielle Anforderungen, welche sich durch die Verwendung eines schichtweise aufgebauten und anisotropen Werkstoffes ergeben, wird eingegangen und sie können im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden. Daher kann eine Optimierung nicht nur unter mechanischen, sondern auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten durchgeführt werden.

## Literatur

- [1] Eickenbusch, Heinz; Krauss, Oliver: *Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau - Ressourceneffizienz und Technologien*. 2. Auflage Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, 2014.
- [2] Tsai, Stephen; Wu, Edward: *A General Theory of Strength for Anisotropic Materials*. Journal of Composite Materials, Volume 5 No. 1, 1971, S. 58 – 80.
- [3] Puck, Alfred: *Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten : Modelle für die Praxis*. München, Wien: Hanser Verlag, 1996.



## **Gewichtsoptimierung in den frühen Phasen der Entwicklung – Anforderungen, Funktionen, Wirkprinzipien –**

**Tobias Luedeke, Romano Bonertz, Michael Vielhaber**

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität des Saarlandes

Campus E 2.9, 66123 Saarbrücken

E-Mail: luedeke@lkt.uni-saarland.de; Internet: <http://www.lkt.uni-saarland.de>

**Inhalt:** Leichtbau und Gewichtsoptimierung werden allgemein als eine der vielversprechendsten Ansätze für die Gestaltung nachhaltiger Produkte angesehen. Allerdings werden die meisten bekannten Methoden für eine Gewichtsoptimierung erst in späten Entwicklungsphasen (Detaillierungs- und Ausarbeitungsphase) und lokal auf bestimmte Komponenten und Subsysteme angewandt, ohne einen Bezug auf das Gesamtsystem zu nehmen. Gerade auch deshalb sind für die heutigen Herausforderungen in Bezug auf Nachhaltigkeit die traditionellen Gewichtsoptimierungsmethoden nicht mehr ausreichend. Ein Transfer zu und die Etablierung von Gewichtsoptimierungsmethoden in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses (besonders auf Konzeptebene) ist wichtig, gerade in Bezug auf die hohen Einflussmöglichkeiten auf Produkteigenschaften im frühen Entwicklungsstadium. Darüberhinaus fehlt eine integrierte Vorgehensweise für innovative, interdisziplinäre Produkte, wie sie mechatronische Systeme darstellen. In diesem Beitrag wird die in einer früheren Veröffentlichung beschriebene Vorgehensweise an einem Beispiel dargestellt.

**Abstract:** Lightweight design and weight optimization in general are seen as one promising of many approaches to create products and services in a sustainable and resource efficient way. However, most of the methods proposed for lightweight design are applied late in the development process (embodiment and detail design) and mostly locally for specific components and subsystems without regarding the system as a whole. For today's sustainability challenges, the traditional weight improvements are not sufficient anymore. A transfer and an establishment of weight optimization methods to earlier design phases, especially the concept design stage, is needed because of the important influence on product properties in these phases. Moreover, a methodology of weight-optimization for innovative, interdisciplinary products, especially mechatronic products and systems, is missing. In this contribution, the method for the consideration of weight optimization during the creation of function structures, working principles and principle solution structure is represented at an usecase.

**Stichwörter:** Gewichtsoptimierung, Anforderungen, Funktionsstruktur, Prinzipiellösung

**Keywords:** Weight Optimization, Requirements, Function Structure, Principle Solution

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Gängige Produktentwicklungsprozesse unterstützen die Aufgabe der Gewichtsoptimierung, zum Beispiel Gewichtsreduktion oder Verbesserung der Gewichtsverteilung, nur unzureichend und unsystematisch. Allerdings wird Gewichtsoptimierung als ein möglicher Ansatz zu einer ressourcen- und energiesparenden Realisierung von Produkten während der Produktion, der Gebrauchsphase und des Recyclings gesehen. Die Aufgabe der Gewichtsoptimierung wird meistens am Ende oder in den späten Phasen des Entwicklungsprozess wahrgenommen. Als Folge daraus ergibt sich die Tatsache, dass das System als Ganzes nicht ausreichend abgedeckt und angesprochen wird. Daraus entstehen zahlreiche Makro-Iterationen mit immensen Entwicklungsänderungen, was dazu führt, dass Entwicklungszeit und -kosten steigen. Erste Ansätze aus verschiedenen Industriebereichen, z.B. Luftfahrt, Automobil- und Schienenverkehr, zielen darauf ab, relevante Gewichtseigenschaften über den ganzen Produktentwicklungsprozess nachverfolgen zu können. Im Gegensatz zur Gewichtsoptimierung dazu erzeugen gestiegene Kundenanforderungen, der Ruf nach Verkürzung der Entwicklungszeit und ein nicht vernachlässigbarer Bedarf an Sicherheitsaspekten oft einen Anstieg am Produktgewicht oder eine Verschlechterung der Gewichtsverteilung und damit auch eine Änderung bei Funktionalität und Performance des Produktes.

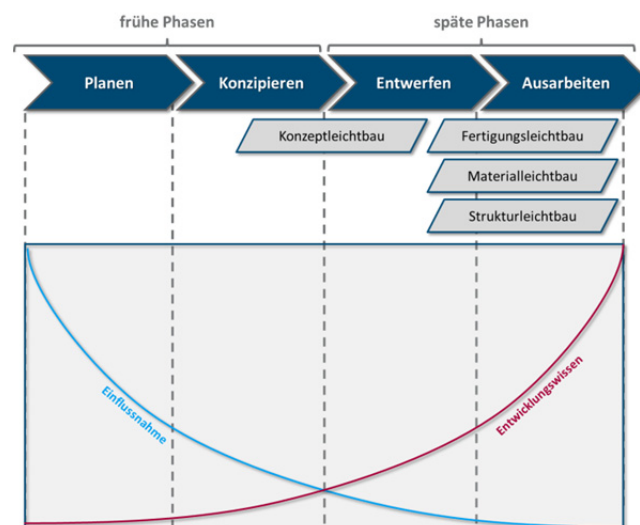


Abbildung 1: Leichtbaustrategien, Produktwissen und Einflussmöglichkeit während des Entwicklungsprozesses ("Paradoxon der Konstruktion"), ähnlich zu [1], [2] und [11]



Gerade wegen der Anwendung der traditionellen Leichtbaumethoden in späten Entwicklungsphasen (vor allem Detaillierung und Ausarbeitung) existiert keine Methode, die die frühen Phasen des Entwicklungsprozess (Planung und Konzeption) ganzheitlich und durchgehend betrachtet. Speziell bei der Konzepterstellung mit Funktionsstrukturen, Wirkprinzipien und Prinziplösungen werden wichtige Produkteigenschaften vordefiniert und auf einen gewissen Lösungsraum limitiert. Trotzdem besteht in den Frühphasen die größtmögliche Einflussnahme auf diese Produkteigenschaften (vergleiche Abbildung 1).

## **1.2 Gewichtseigenschaften im Entwicklungsprozess**

Während des Entwicklungsprozesses ändert sich die Bestimmung von Gewicht und gewichtsbezogenen Eigenschaften (Gewichtsverteilung, Schwerpunktlage, ...). In frühen Phasen werden viele der Produkteigenschaften abgeschätzt oder grob berechnet zum Beispiel durch Benchmarking oder Design Review von Vorgängerprodukten. Trotz dieser unscharfen und vagen Informationen über Gewichtseigenschaften besteht eine große Möglichkeit, Gewichtsoptimierung im Gegensatz zu den spät im Entwicklungsprozess eingesetzten traditionellen Methoden voranzutreiben, wenn im Speziellen die Konzeptphase berücksichtigt wird, die den höchsten Einfluss auf Gewichteigenschaften nehmen kann.

Deshalb ist es notwendig und unausweichlich, diese frühen Entwicklungsphasen in Betracht zu ziehen, um das volle Potenzial von Leichtbaulösungen für die Produktentwicklung auszuschöpfen. Das Ziel dieses Beitrages ist den Nutzen einer schon in einer früheren Veröffentlichung vorgestellten Vorgehensmethode [6] an einem Beispiel zu zeigen.

## **2 Ansatz für eine Gewichtsoptimierung in frühen Phasen**

Die integrierte Vorgehensweise für die Berücksichtigung von gewichtsrelevanten Eigenschaften (Gewicht, Gewichtsverteilung, Schwerpunktlage etc.) während der frühen Phasen des Entwicklungsprozesses ist in folgender Darstellung (Abbildung 2) abgebildet und orientiert sich an den Prozessschritten von Pahl/Beitz [7] und der VDI-Richtlinie 2221 [12].

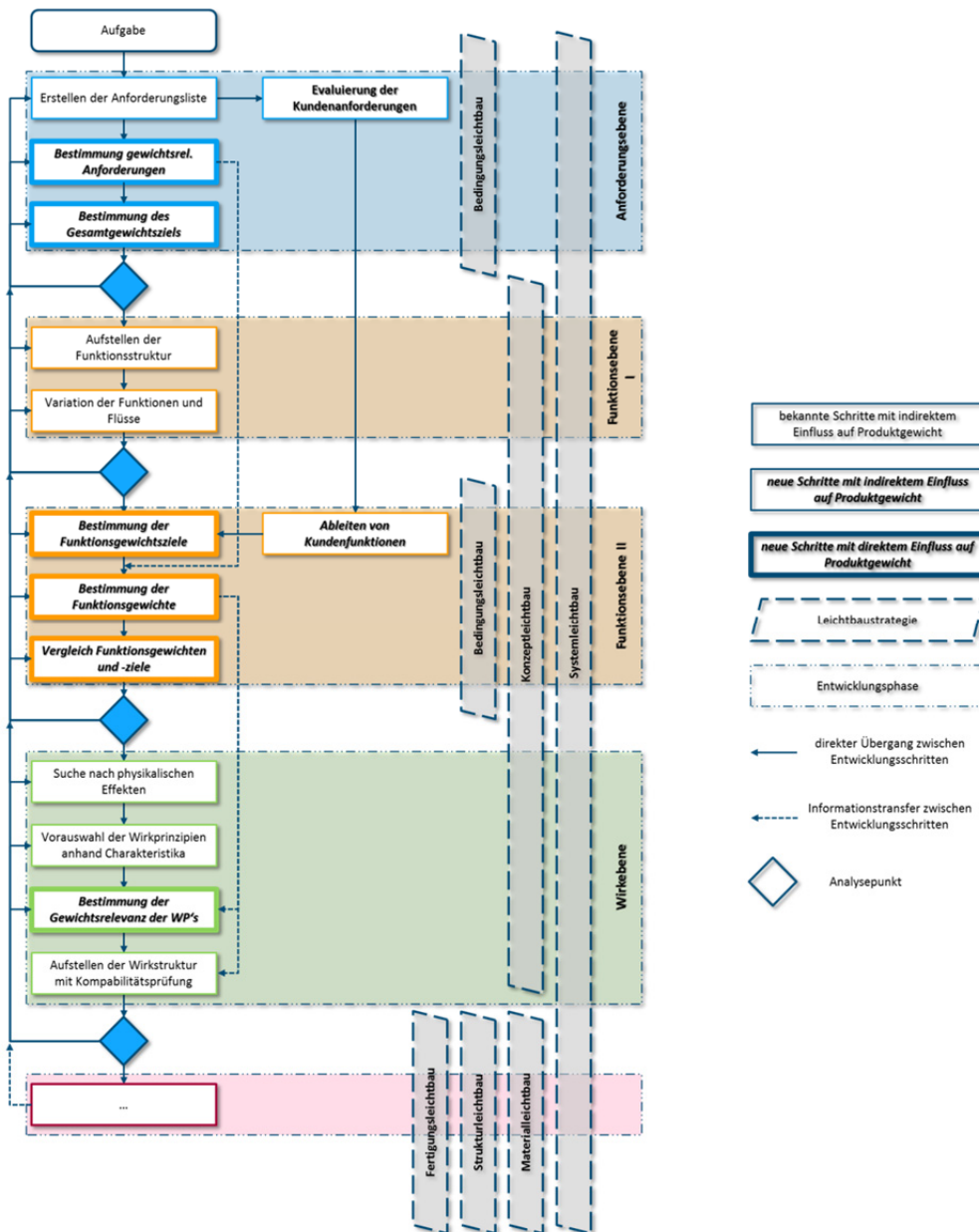


Abbildung 2: Allgemeine Vorgehensweise [6]

Darüberhinaus werden Methoden für diverse Einzelschritte berücksichtigt und angepasst: auf der Anforderungsebene die Methoden der Wertanalyse Gewicht von Feyerabend [3], Methode der gewichtskritischen Anforderungen von McLellan [4] sowie die „Lazy Part Indication“ von Namouz [5]; auf Funktionsebene die Funktionsmassenanalyse von Posner [9, 10] oder die Funktionsgewichtsanalyse von Ponn [8]. Bei der Suche nach Wirkprinzipien und Erstellung der Wirkstruktur konnten keine Methoden identifiziert werden. Die detaillierte Beschreibung der Teilschritte kann in einer anderen Abhandlung der Autoren nachgelesen werden [6].

### 3 Beispielanwendung

#### 3.1 Problemstellung

Die vorgestellte Vorgehensmethode wird im Folgenden am Beispiel eines elektrischen Korkenziehersystems vereinfacht gezeigt. Ausgangspunkt sind hier Kundenbefragungen und Analysen, bei denen sich herausstellte, dass das Öffnen von verkorkten Weinflaschen mittels elektrischem Korkenzieher oftmals nachteilig ist.

Als Schwierigkeiten und Defizite konnten dabei identifiziert werden:

- Durch die impulsive Kraft bei der Betätigung des Korkenziehersystems bleiben öfter Korkreste in der Flasche zurück.
- Mit einem Satz Batterien können lediglich circa 30 Flaschen geöffnet werden.
- Der Korkenzieher ist in den meisten Fällen zu schwer (Gewicht ca. 1,5kg).
- Die Geräuschentwicklung bei der Anwendung ist hoch (Lautstärke ca. 70dB).

Bei der Entwicklung des neuen Korkenziehersystems sollen alle Probleme weitestgehend behoben werden, wobei das Hauptaugenmerk auf der Reduktion des Gesamtsystemgewichts liegt.

#### 3.2 Anforderungsebene

Ziel in der Anforderungsebene ist die Bestimmung der gewichtsrelevanten Anforderungen sowie des Gesamtsystemgewichtsziels, das mit Hilfe von Produkt- und Marktanalysen festgelegt wird. Die gewichtsmodifizierte Anforderungsliste gestaltet sich wie folgt:

| F/W | Anforderungsliste |   | Gewichtskritisch |      | Abhängige Beziehung |
|-----|-------------------|---|------------------|------|---------------------|
| F   | 1                 | Öffnen einer Flasche mit Korken                               | Ja               |      | 2,4,7,8,9           |
| F   | 2                 | Keine Korkreste im Wein                                       | Ja               |      | 1,4                 |
| W   | 3                 | Anzahl der geöffneten Weinflaschen anzeigen                   | Ja               |      |                     |
| F   | 4                 | Wenig Kraftaufwand  | Ja               |      | 7, 8                |
| F   | 5                 | Sowohl im Hausgebrauch als auch in der Gastronomie einsetzbar | Ja               |      |                     |
| F   | 6                 | Einfache Bedienbarkeit  |                  | Nein |                     |
| F   | 7                 | Korkenöffnungszeit max. 15 Sekunden                           |                  | Nein | 1,3,4               |
| F   | 8                 | Gewicht max. 500g   | Ja               |      | 1,3,4               |
| F   | 9                 | Öffnen von allen Standard-Weinflaschen mit Korken             |                  | Nein |                     |
| W   | 10                | Leichte Wartung   |                  | Nein |                     |
| F   | 11                | Keine Verletzungsgefahr                                       |                  | Nein | 1,2,4               |

Abbildung 3: Gewichtsmodifizierte Anforderungsliste

Zusätzlich wird eine gewichtete Rangfolge der Kundenanforderungen (in diesem Fall durch paarweisen Vergleich) erzeugt. Diese Rangfolge findet später Anwendung.

### 3.3 Funktionsbene I

Die Funktionsebene I befasst sich lediglich mit den technischen Funktionen, d.h. die Funktionen, die sich aus der Anforderungsliste ergeben. Nach dem Erstellen des Funktionsmodells in umsatzorientierter Darstellung aus dem zu vergleichenden Vorgängerprodukt werden die Funktionen allesamt durch Elementarfunktionen ausgedrückt.

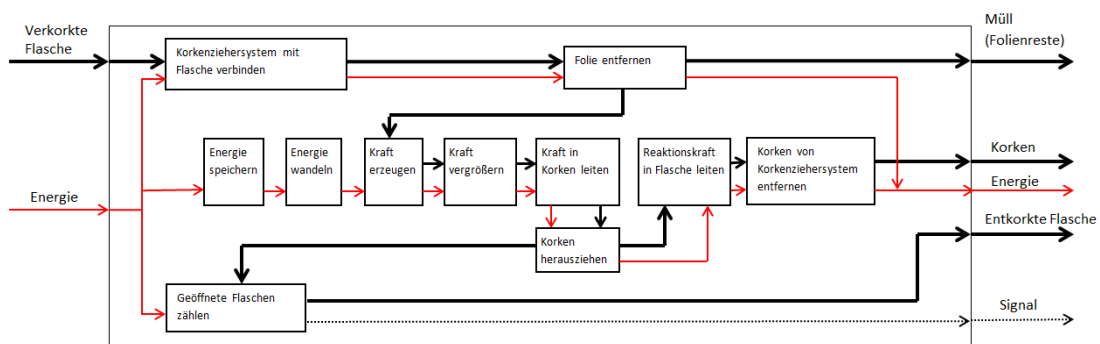


Abbildung 4: Funktionsmodell, dargestellt mit Elementarfunktionen

Durch Variation von Funktionen (Integrieren, Separieren, Eliminieren, Substituieren, Exkludieren) und Flüssen (Vermeiden von Stofffluss, Fördern von Energiefluss) kann die Funktionsstruktur in der Art optimiert werden, dass die Zahl der Funktionen wesentlich reduziert wird, was einer indirekten Gewichtsoptimierung entspricht, da davon ausgegangen wird, dass weniger Funktionen weniger Gewicht nach sich ziehen.

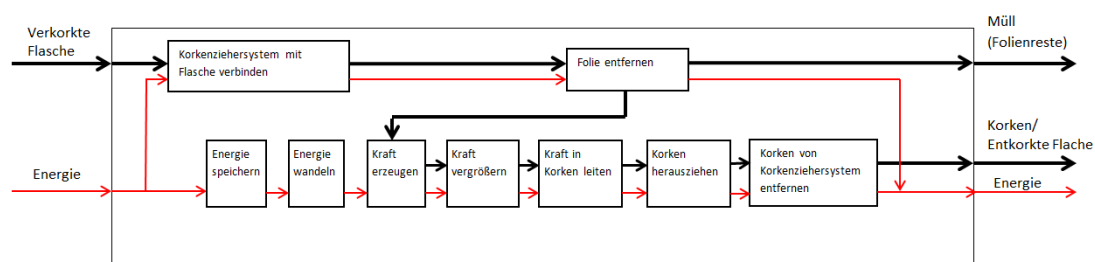


Abbildung 5: Gewichtsoptimierte Funktionsstruktur

### 3.4 Funktionsebene II

Funktionsebene II zieht die aus den Kundenanforderungen abgeleiteten Kundenfunktionen zu Rate. Posner [9, 10] geht dabei davon aus, dass durch Einbeziehung von Kunden das Leichtbaupotenzial erheblich gesteigert werden kann. Durch ein modifiziertes „House of Quality“ aus der Methode Quality Function Deployment werden in der Funkti-

onsmassenanalyse nach [9, 10] Kundenfunktionen mit den technischen Funktionen verglichen. Dabei wird bestimmt, zu welchem Anteil die technischen Funktionen die Kundenfunktionen erfüllen. Somit können jeder technischen Teilfunktion Funktionsgewichtsziele zugeordnet werden.

|                          | Gewichtung             | Technische Funktionen |   |                   |                 |                |                        |                  |                     |   |
|--------------------------|------------------------|-----------------------|---|-------------------|-----------------|----------------|------------------------|------------------|---------------------|---|
|                          |                        | Folie entfernen       | Korkenziehersystem mit Flaschenhals verbinden | Energie speichern | Energie wandeln | Kraft erzeugen | Kraft in Korken leiten | Kraft vergrößern | Korken herausziehen | Korken von Korkenziehersystem entfernen |
| Kundenfunktionen         | Funktionserfüllung     | 0,31                  | 10%   | 10%               | 10%             | 10%            | 25%                    | 25%              | 10%                 |   |
|                          | wenig Kraftaufwand     | 0,25                  |   |                   | 20%             |                |                        | 60%              | 20%                 |   |
|                          | schnelles Öffnen       | 0,14                  | 10%   | 10%               |                 | 10%            | 10%                    | 20%              | 20%                 |   |
|                          | Korkreste vermeiden    | 0,19                  |   |                   |                 |                | 40%                    |                  | 20%                 | 40%                                     |
|                          | HH & Gastronomie       | 0,03                  |   |                   | 60%             |                |                        | 40%              |                     |   |
|                          | einfache Bedienbarkeit | 0,08                  | 10%   | 10%               |                 | 20%            |                        | 30%              | 30%                 |   |
| Funktionsgewichtziel [g] |                        | 480,00                | 26  | 26                | 48              | 22             | 58                     | 79               | 103                 | 36                                      |

Abbildung 6: Bestimmung von Funktionsgewichtszielen

Der nächste Schritt beinhaltet die Bestimmung von Funktionsgewichten (z.B. [8, 9]). Hier erfolgt analog zur Bestimmung der Funktionsgewichtsziele ein Vergleich von Komponenten bzw. Bauteile des Vorgängerproduktes mit den ermittelten technischen Funktionen. D.h. es wird abgeschätzt, zu welchem Anteil die Bauteile zur Erfüllung jeder einzelnen technischen Funktion beitragen. Dadurch können den technischen Funktionen Gewichtsanteile zugeordnet werden. Diese werden abschließend mit den Funktionsgewichtszielen verglichen. Werden die Funktionsgewichtsziele unterschritten, besteht kein weiterer Optimierungsbedarf. Übertrifft allerdings das Funktionsgewicht das Funktionsgewichtziel, ist die Funktion gewichtskritisch und muss leichtbaugerecht optimiert werden bzw. im weiteren Verlauf der Entwicklung besonders berücksichtigt werden.

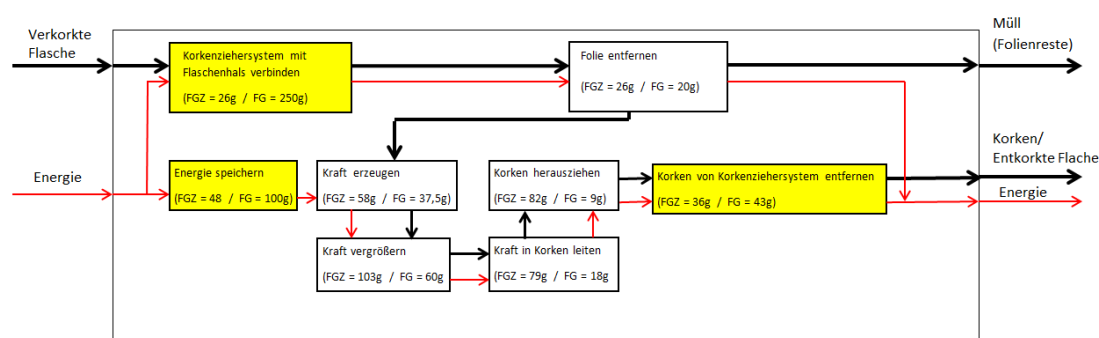


Abbildung 7: Gewichtsoptimierte Funktionsstruktur mit gewichtskritischen Funktionen

### 3.5 Wirkebene

Aufbauend auf der gewichtsoptimierten Funktionsstruktur werden für jede Teilfunktion die möglichen physikalischen Effekte zur Realisierung der Teilfunktionen recherchiert z.B. aus Konstruktionskatalogen oder anderen Wissensspeichern. Durch eine Vorauswahl der Wirkprinzipien anhand charakteristischer Eigenschaften kann die Anzahl der in Frage kommenden Lösungen eingeschränkt werden.

| Funktion   | Rangfolge | Wirkprinzip                             |        |
|--|-----------|---|--------|
| Folie entfernen (TF 1)                               | 1.        | Mechanisch Zerteilen                    | WP 1.1 |
|  | 2.        | Spanen mit geometrisch best. Schneide   | WP 1.2 |
|  | 3.        | Spanen mit geometrisch unbest. Schneide | WP 1.3 |
| Korkenziehersystem mit Flaschenhals verbinden (TF 2) | 1.        | Manuell (anfassen)                      | WP 2.1 |
|  | 2.        | Verkanten                               | WP 2.2 |
|  | 3.        | Zuführen - Klemmen                      | WP 2.3 |
|  | 4.        | Zuführen - Klammern                     | WP 2.4 |
|  | 5.        | Fügen durch Pressverbindung             | WP 2.5 |
|  | 6.        | Verspannen                              | WP 2.6 |
| Energie speichern (TF 3)                             | 1.        | Metallfeder                             | WP 3.1 |
|  | 2.        | Kondensator                             | WP 3.2 |
|  | 3.        | Akku                                    | WP 3.3 |
|  | 3.        | Batterie                                | WP 3.4 |
| Kraft erzeugen (TF 4)                                | 1.        | Gleitreibung                            | WP 4.1 |
|  | 2.        | Kolben                                  | WP 4.2 |
|  | 3.        | Federdeformation                        | WP 4.3 |
|  | 4.        | Zentrifugalkraft                        | WP 4.4 |
|  | 5.        | Corioliskraft                           | WP 4.5 |
|  | 6.        | Elektromagnet                           | WP 4.6 |
|  | 7.        | Induktionseffekt                        | WP 4.7 |

| Funktion   | Rangfolge | Wirkprinzip          |        |
|--|-----------|----------------------|--------|
| Kraft in Korken leiten (TF 5)                            | 1.        | Einstecken           | WP 5.1 |
|  | 2.        | Eindrehen            | WP 5.2 |
|  | 3.        | Dazwischen stecken   | WP 5.3 |
|  | 4.        | Ansaugen             | WP 5.4 |
| Kraft vergrößern (TF 6)                                  | 1.        | Keil                 | WP 6.1 |
|  | 2.        | Klinke               | WP 6.2 |
|  | 3.        | Drehkeil             | WP 6.3 |
|  | 3.        | Schraube             | WP 6.4 |
|  | 5.        | Pneumatik            | WP 6.5 |
|  | 6.        | Hydraulikzylinder    | WP 6.6 |
|  | 7.        | Übersetzungsgetriebe | WP 6.7 |
| Korken herausziehen - Ansatz der Kräfte am Korken (TF 7) | 1.        | Mittig einstecken    | WP 7.1 |
|  | 2.        | Mittig eindrehen     | WP 7.2 |
|  | 3.        | Einstecken           | WP 7.3 |
|  | 4.        | Korken reindrücken   | WP 7.4 |
| Korken von Korkenziehersystem entfernen (TF 8)           | 1.        | Manuell rausziehen   | WP 8.1 |
|  | 1.        | Rausdrehen           | WP 8.2 |
|  | 1.        | Rausdrücken          | WP 8.3 |
|  | 4.        | Federdruck           | WP 8.4 |

Abbildung 8: Vorauswahl der Wirkprinzipien mit Gewichtsranfolge

Der abschließende Schritt in der Wirkebene beinhaltet die Darstellung der prinzipiellen Lösungen in einer Morphologischen Matrix, wobei einerseits die Funktionen nach ihrer Gewichtsrelevanz als auch die Wirkprinzipien nach ihrer Gewichtsrelevanz aufgelistet werden.

|                             |      | FGZ [%] | Gewichtsrelevanzrangfolge 2                       |             |             |             |             |             |             |
|-----------------------------|------|---------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Gewichtsrelevanzrangfolge 1 | TF 6 | 0,215   | WP 6.1<br>1                                       | WP 6.2<br>2 | WP 6.3<br>3 | WP 6.4<br>3 | WP 6.5<br>3 | WP 6.6<br>6 | WP 6.7<br>7 |
|                             | TF 7 | 0,17    | WP 7.1<br>1                                       | WP 7.2<br>2 | WP 7.3<br>3 | WP 7.4<br>4 |             |             |             |
|                             | TF 5 | 0,165   | WP 5.1<br>1                                       | WP 5.2<br>2 | WP 5.3<br>3 | WP 5.4<br>4 |             |             |             |
|                             | TF 4 | 0,12    | WP 4.1<br>1                                       | WP 4.2<br>2 | WP 4.3<br>3 | WP 4.4<br>4 | WP 4.5<br>5 | WP 4.6<br>6 | WP 4.7<br>7 |
|                             | TF 3 | 0,1     | WP 3.1<br>1                                       | WP 3.2<br>2 | WP 3.3<br>3 | WP 3.4<br>3 |             |             |             |
|                             | TF 8 | 0,075   | WP 8.1<br>1                                       | WP 8.2<br>1 | WP 8.3<br>1 | WP 8.4<br>4 |             |             |             |
|                             | TF 1 | 0,055   | WP 1.1<br>1                                       | WP 1.2<br>2 | WP 1.3<br>3 |             |             |             |             |
|                             | TF 2 | 0,055   | WP 2.1<br>1                                       | WP 2.2<br>2 | WP 2.3<br>3 | WP 2.4<br>4 | WP 2.5<br>5 | WP 2.6<br>6 |             |
|                             | TF 9 | 0,045   | TF 9 (Energie wandeln) wird nicht berücksichtigt! |             |             |             |             |             |             |

Abbildung 9: Morphologischer Kasten mit zweidimensionaler Gewichtsrelevanzrangfolge

Durch die Berechnung des funktions- und wirkprinzipabhängigen Gewichtsrangfolgewert aus den beiden Gewichtsrelevanzrangfolgen können verschiedene Gesamtlösungsalternativen, die sich aus Kompabilitätsbetrachtungen ergeben, bezüglich ihres Gewichtes miteinander verglichen werden. So ergibt sich ein Gewichtsrangfolgewert für das Vorgängerprodukt (rote Lösung) von 3,175 und für die neu gefundene Prinzipiellösung (blaue Lösung) ein Wert von 1,935. Die theoretisch beste Lösung am Gewichtsrangfolgewert gesehen wäre die durch grün gekennzeichnete Wirkstruktur, die allerdings aufgrund von Inkompatibilitäten nicht zustande kommen kann. Somit kann abschließend festgestellt werden, dass die neu gefundene Prinzipiellösung wesentlich besser bezüglich des Gewichtes angesehen werden kann.

### **3.6 Weitere Schritte**

Die in den vorhergehenden Schritte gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse können in der Detaillierungs- und Ausarbeitungsphase weiter konkretisiert und bezüglich des Leichtbaupotenzials mithilfe der traditionellen Leichtbaustrategien (Fertigungsleichtbau, Formleichtbau, Materialleichtbau) weiter optimiert werden.

## **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Dieser Beitrag hat die integrierte Vorgehensweise für die Berücksichtigung gewichtsrelevanter Kriterien in frühen Entwicklungsphasen an einem Beispiel verdeutlicht. Dabei wurden sowohl Anforderungen als auch Funktionen und Funktionsstrukturen sowie Wirkprinzipien und Wirkstrukturen betrachtet. Mithilfe des Ansatzes konnten Funktionen (Funktionsgewichte) und Wirkprinzipien (Wirkgewichtsanteile) „gewichtsbehaftet“ betrachtet werden und somit zur Bewertung in Bezug auf Gewichtskriterien verwendet werden. Insbesondere konnte auf Funktionsebene eine derartige Verbesserung erreicht werden, dass die Anzahl der relevanten Teilfunktionen von 11 auf 8 reduziert werden konnte. Desweiteren konnten auf Wirkebene „leichtere“ Wirkprinzipien gefunden werden, die die gesteckten Ziele bezüglich des Gesamtgewichts schneller und einfacher erfüllen können.

Nichtsdestotrotz steht außer Frage, dass eine alleinige Bewertung nur nach Gewichtskriterien nicht zielführend ist. Allerdings bietet der Ansatz durch die Einführung weiterer Dimensionen die Möglichkeit, multikriterielle Entscheidungen zu unterstützen (z.B. Kosten vs. Gewicht vs. Funktionalität), was im Fokus weiterer Forschungsarbeiten steht.

Darüberhinaus soll der Ansatz in den Produktentwicklungsprozess interdisziplinärer Produkte, vor allem mechatronische Systeme, integriert werden.

## Literatur

- [1] Dahm, H.-P.; Voigt, B.; Gatzka, R.: *Fahrzeugdiät durch Computer Aided Weightmanagement* In: *Verkehr und Technik*, vol. 58, no. 7, pp. 265-269, 2006
- [2] Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München, Wien. Hanser, 2009
- [3] Feyerabend, F.: *Wertanalyse Gewicht - Methodische Gewichtsreduzierung am Beispiel von Industrierobotern*. Düsseldorf VDI-Verlag, 1991
- [4] McLellan, J.M.; Maier, J.R.A; Fadel, G.M.; Mocko, G.M.: *A Method for Identifying Requirements Critical to Mass Reduction Using DSMs and DMMs*. In Kreimeyer, M.; Maier, J.; Fadel, G.; Lindemann, U. (Hg.): *Proceedings of the 11th International Design Structure Matrix Conference*. Greenville, South Carolina. The Design Society, 2009
- [5] Namouz E.: *Mass and Assembly Time Reduction for Future Generation Automotive Vehicles Based on Existing Vehicle Model*. Master Thesis, Clemson University Graduate School, 2010
- [6] Luedeke, T.; Bonertz, R.; Vielhaber, M.: *Weight Optimization Approach for Conceptual Design – Requirements, Functions, Working Principles*. In: Laakso, M. & Ekman, K. (Hg.), *Proceedings of NordDesign 2014 Conference*. Aalto. Aalto Design Factory, 2014
- [7] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Engineering design. A systematic approach. Third edition*. London. Springer-Verlag, 2007
- [8] Ponn, J.; Lindemann, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte – Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen*. Berlin. Springer-Verlag, 2011.
- [9] Posner, B.; Binz, H.; Roth, D.: *Grundlagen zur Berücksichtigung von Design for X bei Funktionsstrukturen am Beispiel des Design for Lightweight*. In: Spath, D.; Bertsche, B.; Binz, H. (Hg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2013*. Stuttgart. Fraunhofer-Verlag, 2013.
- [10] Posner, B.; Binz, H.; Roth, D.: *Supporting Lightweight Design Potential Assessment in the Conceptual Stage* In Marjanovic, D. et al. (Hg.): *Proceedings of the 13th International Design Conference DESIGN 2014*. Dubrovnik, Glasgow. The Design Society, 2014
- [11] Schmidt, W.; Puri, W.: *Systematische Entwicklung gewichtsoptimierter Bauteile*. In Meerkamm, H. (Hg.): *Beiträge zum 11. Symposium DfX*. Erlangen. Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, 2000
- [12] Verein Deutscher Ingenieure, *VDI guideline 2221: Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products*. Berlin. Beuth, 1987



# Berechnungsmodelle im Sinne von Prognose und Therapieplanung bei schweren Schädel-Hirn-Traumata

Hans-Peter Prüfer

Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik, Ruhr-Universität Bochum

Universitätsstraße 150, 44801 Bochum

E-Mail: hp@itm.rub.de

**Inhalt:** Eine typische Folge von schweren Schädel-Hirn-Verletzungen ist der durch Ödembildung stark erhöhte Hirndruck. Zur Vermeidung irreparabler Hirnschäden sind dabei schnelle Maßnahmen erforderlich. Therapie der Wahl ist die Druckentlastung mittels Kraniektomie. Aufgrund der extrem schwierigen Diagnosesituation ist eine systematische Operationsplanung ebenso wenig möglich wie eine Prognose des Heilungsverlaufs. Als Lösungsmöglichkeit bietet sich eine numerische Simulation des mechanischen Verhaltens des Systems Schädel-Hirn mittels der Methode der Finiten Elemente an. In diesem Beitrag werden neue Materialmodelle betrachtet, und es wird untersucht, welcher Detaillierungsgrad bei der geometrisch-mechanischen Modellierung für eine praktikable Vorhersage erforderlich ist.

**Abstract:** Increased intracranial pressure is often caused by severe injuries of skull and brain. Standard therapy is the so-called decompression hemicraniectomy. Because the surgical intervention has to be done nearly immediately there is not much time left for in-depth planning. To get some insight into the chances of healing numerical calculations of the mechanical behaviour of the pressurized skull-brain system will be helpful. This is feasible by means of the Finite Element Method. Here material models and material data are critical. Likewise, the geometry and the inhomogeneous mechanical properties of the brain have to be considered, and we have to come to a decision concerning the degree of model simplification.

**Stichwörter:** Hirndruck, Neurochirurgie, FEM, hyperelastisches Verhalten

**Keywords:** intracranial pressure, neurosurgery, FEM, hyperelasticity

## 1 Ausgangssituation und Motivation

Schädel-Hirn-Verletzungen stellen die Neurochirurgie auch heute noch vor große Herausforderungen. Verlässliche Diagnosen sind trotz moderner bildgebender Verfahren schwierig, detaillierte Aussagen erweisen sich als beinahe unmöglich. Eine Prognose des Heilungsverlaufs kann dabei nur als spekulativ bezeichnet werden. Eine beklemmende Aktualität hat dieses Thema in der Öffentlichkeit durch den Skiunfall einer deutschen Sportikone erlangt. In der überwiegenden Mehrzahl der Nachrichten wurde dabei jedoch nicht nur die Diagnose-/Prognoseproblematik völlig ignoriert, sondern es wurden sogar – gewiss

aus Unkenntnis! - gute Heilungschancen suggeriert. Seitens der Neurochirurgie ist hier ein deutlicher Handlungsbedarf identifiziert worden. Die Standardtherapie ist die Kraniektomie mit Duraplastik. Dabei handelt es sich um die teilweise Entfernung von Schädeldecke (Cranium) und harter Hirnhaut (Dura) zur Verminderung des durch ein Ödem verursachten Druckanstiegs, wobei die Duraöffnung wieder soweit geschlossen werden muss, dass die sehr weiche Hirnmasse stabilisiert wird. Daraus ergeben sich zwei grundsätzliche Fragestellungen. Ist eine Kraniektomie notwendig oder kann der Hirndruck ohne zusätzliche Maßnahmen zurückgehen? Wenn die Kraniektomie notwendig ist: An welcher Stelle sollte ein wie großer Anteil der Schädeldecke entfernt werden? Wenn solche Entscheidungen von bloßer Heuristik befreit werden sollen, ist eine nachvollziehbare und reproduzierbare Vorhersage der Ödemgenese unverzichtbar. Angesichts der oben getroffenen Aussagen erscheint dieser Gedankengang zunächst utopisch. Dennoch sollen im Folgenden grundsätzliche Überlegungen angestellt werden, mit denen Auswege aus dieser unbefriedigenden Situation möglich werden.

## **2 Diagnostische Schwierigkeiten**

Schädigungen des Hirns als Folge äußerer Verletzungen sind primär nur indirekt erkennbar. Typisch sind Störungen der Sensorik, motorische Probleme, Erbrechen sowie Bewusstseinsverlust. Je nach vermuteter Schwere der äußeren Einflüsse geht man von einer Gehirnerschütterung bis zu einer schweren Schädigung der Hirnsubstanz aus.

Das heute allgemein übliche Diagnosehilfsmittel ist die Computertomographie (CT). Dieses bildgebende Verfahren macht Dichteunterschiede des untersuchten Objekts schichtweise sichtbar. Damit sind sowohl Hohlräume als auch unterschiedliche Gewebearten erkennbar. Ebenfalls erkennbar sind Veränderungen der geometrischen Hirnstruktur wie beispielsweise das Kollabieren der Ventrikel oder eine asymmetrische Verschiebung, die auf einen einseitigen Druckanstieg schließen lässt. In derartigen Fällen sind sofortige Interventionen erforderlich, da das zur Verfügung stehende Zeitfenster maximal etwa zwei Stunden umfasst. Lokalisation und Veränderung des den Druckanstieg auslösenden Ödems kann man auf diese Weise jedoch nicht bestimmen, auch nicht durch Sequenzen von CT. Bessere Möglichkeiten bietet das diffusionsgewichtete MRT. Hier lassen sich Veränderungen der Diffusivität darstellen, die Hinweise auf Ödeme geben. Prinzipiell wäre es also möglich, den Verlauf der Ödembildung zu verfolgen. Dem steht jedoch der Zeitbe-

darf für die Auswertung entgegen: Ist ein klassisches CT des Schädelbereichs in 2 bis 5 Minuten erstellt, so werden für ein MRT mindestens 30 Minuten benötigt; bei einem diffusionsgewichteten MRT (DTI) geht man sogar von mindestens 60 Minuten aus. Dafür reicht das genannte Interventionszeitfenster bei weitem nicht aus. Für eine Prognose können daher keine realen Verlaufsdaten genutzt werden. Einen Ausweg könnten hier rechnergestützte Simulationen bieten, mit denen modellhafte Prädiktionen des mechanischen Verhaltens des Systems Schädel-Hirn möglich sind.

### **3 Modellbildung und Simulation**

Das rechnerische Verfahren der Wahl zur Beschreibung mechanischer Phänomene ist die Methode der Finiten Elemente (FEM), die sich nicht nur im Rahmen des konventionellen Maschinenbaus, sondern ebenso in der Biomechanik gut bewährt hat. Sie geht von der Diskretisierung eines geometrischen Modells der zu analysierenden Struktur aus, die mit Materialeigenschaften und Randbedingungen in Form von Fesselungen und Lasten versehen wird.

Im Falle der als Standard anzusehenden mechanischen Analysen des Maschinenbaus ist die Modellbildung eher einfach. Hierbei sind die Regeln per Konvention durchaus bekannt und bewährt. Für die Analyse des Verhaltens von Hirngewebe, insbesondere nach Schädigung, gibt es dagegen kaum konsensuelle Erfahrungen, auf die man zurückgreifen könnte, darüber hinaus begegnet man ethischen Implikationen, da es sich um eine medizinische Intervention handelt. Aufgrund der problematischen Diagnostik wird eine numerische Simulation durch die Unschärfe der Eingangsinformationen zusätzlich erschwert. Unter dem Aspekt, dass die geplante Simulation in einem klinischen Umfeld eingesetzt werden soll, sind sowohl eine hohe Auswertungsgeschwindigkeit als auch eine einfache und sichere Bedienung unverzichtbare Forderungen. Möchte man diesen gerecht werden, so ist ein bestes, also minimales Modell anzustreben. Das physikalische Phänomen, das uns hier interessiert, ist die Druckverteilung im Hirn und die Prädiktion ihrer zeitlichen Entwicklung. Wie eine geeignete Modellierung zu entwerfen ist, soll in den folgenden Abschnitten untersucht werden.

## 4 Materialgesetze

Die FEM liefert als Primärergebnis Knotenfreiheitsgrade, aus denen Spannungswerte abgeleitet werden. Der Zusammenhang wird im Wesentlichen durch die Spannungs-/Dehnungsbeziehung vermittelt. Sie enthält das Materialverhalten. Für biologische Materialien gibt es hier zwei Problemkreise. Einerseits muss ein geeignetes Materialgesetz gefunden werden, welches üblicherweise nichtlinear ist, andererseits muss das gewählte Materialgesetz mit Messdaten identifiziert werden.

Als ausgesprochen schwierig erweist sich dabei die messtechnische Erfassung von Materialparametern. Meist greift man dabei auf Proben von frisch geschlachteten Tieren [1] zurück. Traditionelle Zug- oder Biegeversuche sind angesichts der extremen Weichheit gerade des Hirngewebes mit sehr großen Fehlern behaftet. Zudem verhält sich Lebendgewebe anders als das von getöteten Tieren. Diese Unterschiede können hier jedoch vernachlässigt werden; Versuche von Miller an lebenden Schweinen bestätigen dies [3]. Angesichts der schon im Falle der Tierversuche großen ethischen Probleme sind Messungen an menschlichem Hirngewebe in der beschriebenen Form ausgeschlossen. Berücksichtigt man, wie stark die Messergebnisse und die daraus erschlossenen Daten streuen, so wird man sich gewiss auf die Ähnlichkeit von menschlichem und tierischem Hirngewebe verlassen dürfen.

Der Versuch, Millers Simulationsergebnisse [3] für das Schweinehirn zu reproduzieren, ist im Übrigen trotz Verwendung der gleichen Software vollständig gescheitert [4]. Zudem zeigen die bereits erwähnten neueren Messergebnisse erhebliche Abweichungen von Millers Daten.

Die aktuellsten Ansätze zur Materialbeschreibung liefern [2,5]. Besonders interessant ist, dass bis zu Dehnungen von 30% ein hyperelastischer Ansatz nach Ogden sehr gute Übereinstimmungen mit Messungen zeigt. Für unsere grundsätzliche Aufgabenstellungen genügt das Ogden-Verhalten zur geringsten Dehnrate, da die Lastveränderungen mit geringer Geschwindigkeit erfolgen und sehr große Dehnungen nicht zu erwarten sind. Der Fehler, der durch die dennoch zu hohe Dehnrate entstehen dürfte, erscheint jedoch tolerierbar, weil gerade diese Daten experimentell sehr gut verifiziert sind. Aus diesen Gründen wurde entschieden, zunächst mit den Daten aus der ersten Spalte der Tabelle 1 als Referenz zu arbeiten. Alternative Materialdaten liefert [6].

Tabelle 1: Ogden-Parameter nach [2]

|                    | Dehnrate 30/s | Dehnrate 60/s | Dehnrate 90/s |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| Schubmodul $\mu$   | 6kPa          | 9kPa          | 12kPa         |
| Parameter $\alpha$ | 0.5           | 1.4           | 5.1           |

## 5 Ödemspezifisches

Für die Modellierung der Ödemveränderungen benötigt man zwei Informationen, nämlich die Lokalisierung des Ödems innerhalb des Hirns sowie die mögliche Richtung seiner Weiterentwicklung. Die Lokalisierung ist ein primär diagnostisches Problem. Anhand von Strukturveränderungen aus einem CT kann man günstigstenfalls grobe Vermutungen anstellen – wir haben bereits angemerkt, dass die zuverlässigere Auswertung mittels DTI entschieden zu zeitaufwendig ist. Da es sich in den kritischen Fällen um eher ausgedehnte Ödeme handelt, dürfte eine ungefähre Vorstellung ihrer Position ausreichen, zumal auch die Zeit für die Prädiktion begrenzt ist.

Das physikalische Phänomen, welches für die Ödemveränderungen maßgebend ist, ist die Diffusion, welche durch osmotische Druckunterschiede bedingt ist. Damit ist die Geometrie eines ödematisch veränderten Bereichs per se nicht exakt beschreibbar. Die Vorhersage der zu erwartenden Veränderungen setzt voraus, dass die räumliche Verteilung der Diffusivität bekannt ist. Hierzu gibt es einen interessanten Ansatz. Mittels DTI und Fibertracking lässt sich die Lage der Nervenfaserbündel bestimmen [7]. Daraus folgt, dass sich Diffusionsbahnen längs dieser Faserbündel ausbilden, so dass die Richtung des Ödemfortschritts abschätzbar ist. Der Nutzen dieser Information ist zur Zeit jedoch noch begrenzt, weil für ein traumatisiertes Hirn weder ein DTI möglich ist noch absolute Daten zur Verteilung des osmotischen Drucks zu Verfügung stehen. Sehr einfache Modellrechnungen erscheinen allerdings realistisch.

## 6 Geometrie

Die geometrische Struktur des gesamten Schädelsystems ist seit Langem anatomisch untersucht worden und darf als vollständig bekannt vorausgesetzt werden. Sie ist jedoch für eine Diskretisierung im Sinne der FEM eher ungeeignet. Die vielen kleinteiligen Details bedingen eine feine Vernetzung, die letztlich eine Genauigkeit vortäuscht, die sich schon

aufgrund der nicht exakt spezifizierbaren Randbedingungen als illusorisch erweist. Es ist allerdings ein Trend zu aufwendigen Elementierungen zu beobachten, der wesentlich darauf basiert, dass Hard- und Software immer leistungsfähiger werden. Diese Materialschlacht wird geführt, „weil wir es können“.

Modelle sollten so konzipiert sein, dass sie mit minimalem Aufwand die gewünschten Ergebnisse liefern. Angesichts der Ungenauigkeiten der Eingangsdaten erscheint eine extrem detaillierte Geometrieerfassung unsinnig. Die erforderliche Detaillierung sollte sich an den zu erwartenden Resultaten orientieren. Da es zunächst nur um eine grundsätzliche, ungefähre Vorhersage der Ödementwicklung geht, ist ein stark abstrahiertes Modell hinreichend. Die patientenindividuelle Modellbildung [8,9,10] ist nur insoweit erforderlich, als die Lage des Ödems und seine Veränderungen betroffen sind. Unter diesen Aspekten kann man davon ausgehen, dass ein generisches Modell ähnlich [4] genügt.

## **7 Randbedingungen**

Betrachtet man das Hirn isoliert, so stellt es eine deformierbare Masse dar, die ausschließlich biegeelastisch an das Rückenmark angebunden ist. Diese Art der Fesselung spielt für das statische Verhalten keine Rolle. Sie ist jedoch dafür verantwortlich, das bei einseitigen impulsartigen Belastungen der Schädels das Hirn infolge seiner Massenträgheit gegen die Schädelknochen geschleudert und dadurch geschädigt wird. Ist der Hirndruck erhöht, kann man davon ausgehen, dass der Kontakt des Hirns über die Dura mit dem Cranium einer Fesselung entspricht. Die Falx, eine sichelförmige Fortsetzung der Dura, die die beiden Hemisphären im oberen Bereich trennt, stellt zwar eine weitere grundsätzlich deformierbare Komponente dar, kann aber näherungsweise ebenfalls als Fesselung betrachtet werden. Das wird durch eine alternative Form der Entlastungskraniotomie plausibel, deren Technik nicht nur eine Entfernung frontaler Schädelknochen, sondern darüber hinaus von Teilen der Falx umfasst. Unser Interesse wird damit auch auf Hirnverschiebungen unterhalb der Falx gelenkt. Weitere mechanisch relevante Bereiche sind die Ventrikel, die als Reserveräume dienen und bei steigendem Hirndruck kollabieren. Hierdurch wird die Schädigung durch den erhöhten Druck verzögert. Ihre Modellierung erfordert die Berücksichtigung des Selbstkontakts der Ventrikelwände.

Hinsichtlich der Beschreibung der internen Druckbelastung ist man auf Plausibilitätsbetrachtungen angewiesen. Der Druck innerhalb des Ödems ist nicht direkt messbar. Als

grobe Annahme kann man die Erhöhung des Gesamtdrucks betrachten. Hier gilt eine dauerhafte Druckerhöhung um 1500 bis 6000 Pa als schädigend. Die Differenz zwischen normalem und erhöhtem Hirndruck bildet einen Startwert für den Ödemdruck, der somit als Druckbelastung auf eine fiktive Begrenzung des Ödems aufgebracht werden kann.

## 8 Versuchsplanung

Die aus der Literatur bekannten Simulationen stellen fast immer Einzelfalluntersuchungen dar. Variationen findet man allenfalls in den Materialdaten, um eine Korrelation mit Messergebnissen herzustellen. Die unterschiedlichen Einflüsse von Modellgeometrie und Art der Randbedingungen, insbesondere der Kontakte, werden dagegen nicht berücksichtigt. Zum besseren Verständnis des mechanischen Verhaltens sollten daher ausführliche Parameterstudien vorgenommen werden.

Die komplexe Geometrie des Hirns und seiner Umgebung hat zur Folge, dass die Auswirkungen der beteiligten physikalischen Phänomene nicht einfach erkennbar sind. Daher wurde ein drastisch vereinfachtes Modell entworfen. Es besteht im Wesentlichen aus einer durch Ebenen begrenzten Struktur, wobei das Ödem in seinem Ausgangsstadium als sphärischer Hohlraum mit einer Druckverteilung beschrieben wird. Anstelle von Kontakten werden einfache Fesselungen verwendet, was zumindest für das Cranium in erster Näherung korrekt ist; die Aussagekraft dieser Modellierung für Randspannungen wurde in [10] bestätigt. Auf Verformungen der Falx wird verzichtet. Als Ventrikelmodell wird ein quaderförmiger Hohlraum vorgesehen, der bei Bedarf mit Selbstkontakt versehen ist.

Die hier angesprochenen einfachen Varianten erlauben eine weitgehend entkoppelte Untersuchung der verschiedenen Einflüsse. Daraus lässt sich die Empfindlichkeit der Simulation gegen Fehler in den Einflussgrößen erschließen. Multikausale Effekte lassen sich auf diese Weise allerdings nicht erkennen; da für diese ein Abgleich mit der Realität ohnehin nicht möglich sein dürfte, dürften kaum Nachteile zu erwarten sein.

## 9 Exemplarische Rechnungen

Das in den folgenden Rechnungen verwendete, noch stärker vereinfachte Modell bildet einen ausgedehnten Indentertest nach. Seine Geometrie entspricht der Vorgehensweise aus einer Bachelorarbeit, in der das hyperelastische Verhalten von Neoprenbelägen

unter Druckbelastungen untersucht wurde [10]. Der Vorgang beschreibt in seinem ursprünglichen Konzept das Greifen eines nichtdeformierbaren Ellipsoids, wobei die Druckverteilung als Ergebnis einer eingepprägten Verlagerung des Ellipsoids entsteht. Das hierfür entwickelte Modell ist hinreichend getestet und kann daher als Basis für weitergehende Materialgesetze dienen.

Angesichts der erheblichen Streubreite bei den Materialdaten wurden zunächst nur die Ogden-Parameter variiert. Dabei stellte sich heraus, dass der – nicht bekannte! – Kompressionsmodul  $K$  einen deutlichen Einfluss auf die Dehnungen hat, zudem verhindern zu hohe Werte wie beispielsweise  $K=100$  (für hyperelastisches Material mit den hier gewählten Ogden-Parametern empfohlen) oft die Konvergenz. Hier wurde durchgehend mit  $K=0.01$  gerechnet, ein Wert, der mit allen ausgewählten Parametern akzeptable Resultate lieferte.

Tabelle 2: Teilergebnisse für ausgewählte Ogden-Parameter

|   |                                 | Vergleichsdehnung | Vergleichsspannung | Druck  |
|---|---------------------------------|-------------------|--------------------|--------|
| 1 | $\mu=6, \alpha=0.5$             | 1.42              | 0.011              | 0.0035 |
| 2 | $\mu=9, \alpha=1.4$             | 1.18              | 0.016              | 0.0047 |
| 3 | $\mu=12, \alpha=5.1$            | 0.84              | 0.032              | 0.0079 |
| 4 | $\mu=6, \alpha=0.5$ ; Rand fest | 1.18              | 0.011              | 0.0045 |

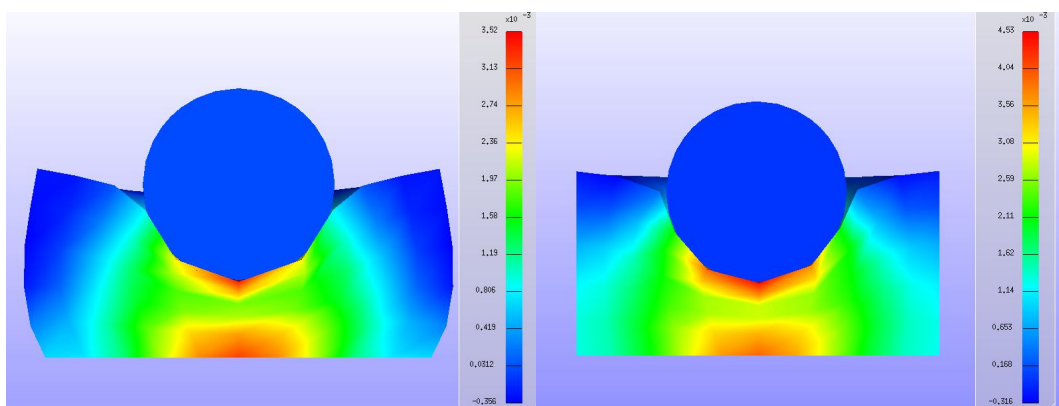


Abbildung 1: Druckverteilung für die Fälle 1 und 4

Es ist klar, dass bei dieser Art der Modellierung keine realistischen quantitativen Aussagen über den Druck in der Hirnmasse möglich sind. Aufschlussreich ist dagegen die Druckverteilung (Abbildung 1). Erwartungsgemäß bildet sich eine Zone erhöhten Drucks



nicht nur unterhalb der Kontaktfläche, sondern ebenso an der Fesselung des unteren Randes aus. Sie repräsentiert in erster Näherung den Kontakt des Hirn mit Dura/Cranium. Der an dieser Stelle erhöhte Druck ist für weitere kritische Schädigungen der Hirnsubstanz verantwortlich, und dort müsste eine Entlastungskraniektomie vorgenommen werden. Die Druckverteilung ist weitgehend unabhängig von den Materialparametern. Fesselt man zusätzlich die seitlichen Begrenzungen in Richtung der Flächennormalen, entsteht im Wesentlichen die gleiche Druckverteilung, wobei der Betrag des Drucks bei dieser Fesselung konsequenterweise höher ist.

## 10 Ein vorläufiges Fazit

Als erste Erkenntnis hat sich herauskristallisiert, dass das grundsätzliche Erscheinungsbild der Druckverteilung nur in geringem Maße vom Materialmodell abhängt. Prinzipiell könnte man also erschließen, an welcher Stelle die Hirnsubstanz erhöhtem Druck ausgesetzt ist, sofern man die Einflusszone des Ödems kennt. Damit kann der Ort für eine Entlastungskraniektomie grob bestimmt werden. Diese Ergebnisse zeigen natürlich nur ein sehr allgemeines Erscheinungsbild. Auf diese Weise kann keineswegs entschieden werden, ob eine Entlastungskraniektomie überhaupt erforderlich ist; dazu müssten zuverlässigere Druckwerte bekannt sein. Die ausgedehnte Verteilung des erhöhten Drucks zusammen mit der diffusen Lokalisierung eines Ödems lässt im Übrigen vermuten, dass eine exakte Beschreibung der Schädel-Hirn-Geometrie nicht unbedingt benötigt wird. Man wird für eine überschlägige, für die Therapieplanung geeignete und deshalb schnelle Analyse auf patientenindividuelle Geometriebeschreibungen sehr wahrscheinlich verzichten können. Dennoch bleiben rechnerische Detailanalysen unverzichtbar. Sie sollten zu einem tieferen Verständnis des Mechanismus der Ödemgenese führen, die *in vivo* nicht ohne ethische Probleme beobachtbar ist.

Besonderer Dank gebührt meiner Bachelorkandidatin Monika Frajkur, die in ihrer Arbeit wertvolle Voruntersuchungen zur Nutzung hyperelastischer Materialgesetze geleistet hat, sowie der Wittener Medienwissenschaftlerin Angela Schröder, deren medizinisch wie technisch gleichermaßen versierte Diskussionsbeiträge die Arbeiten zum Thema dieses Beitrags reanimiert haben.

## Literatur

- [1] Miller, Karol; Chinzei, Kiyoyuki: *Mechanical properties of brain tissue in tension*. J. Biomech. 35 (2002) 483-490
- [2] Rashid, Badar; Destrade, Michel; Gilchrist, Michael D.: *Hyperelastic and viscoelastic properties of brain tissue in tension*. Proc. ASME, IMECE2012-85675, Houston 2012
- [3] Miller, Karol; Chinzei, Kiyoyuki: *Constitutive Modelling of brain tissue: Experiment and theory*. J. Biomech. 30 (1997) 115-1121
- [4] Tunali, Deniz: *Numerische Berechnung eines posttraumatischen Ödems mittels Finite-Elemente-Methode*. Bachelorarbeit, LS Maschinenbauinformatik, Ruhr-Universität Bochum 2008
- [5] Rashid, Badar; Destrade, Michel; Gilchrist, Michael D.: *Mechanical characterization of brain tissue in compression at dynamic strain rates*. J. Mech. Behavior. Biomed. Mat. 10 (2012) 23-38
- [6] Kaster, T.; Sack, I.; Samani, A.: *Measurement of the hyperelastic properties of ex vivo brain tissue slices*. J. Biomech. 44 (2011) 1158-1163
- [7] Basser, Peter J.; Pajevic, Sinisa; Pierpaoli, Carlo; Aldroubi, Akram: *Fiber tract following in the human brain using DT-MRI data*. IEICE Trans. Inf. & Syst. E85-D, 1 (2002) 15-21
- [8] Kyriacou, Stelios K.; Davatzikos, Christos; Zinreich, S. James; Bryan, R. Nick: *Nonlinear elastic registration of brain images with tumor pathology using a biomechanical model*. IEEE Trans. Med. Imag. 18 (1999) 580-592
- [9] Clatz, Olivier; Delingette, Hervé; Bardinet, Eric; Dormont, Didier; Ayache, Nicholas: *Patient specific biomechanical model of the brain: Application to Parkinson's disease procedure*. Lecture Notes Comp. Sci. 2673 (2003) 321-331, INRIA Sophia Antipolis
- [10] Ho, Johnson; Kleiven, Svein: *Can sulci protect the brain from traumatic injury?* J. Biomech. 42 (2009) 2074-2080
- [11] Frajkur, Monika: *Simulation von mechanischen Eigenschaften hyperelastischer Robotergreiforgane zur Nutzung als Feedbackinformation*. Bachelorarbeit, LS Maschinenbauinformatik, Ruhr-Universität Bochum 2014

## Workflow zur Entwicklung effizienter Leichtbaustrukturen am Beispiel einer druckbelasteten Platte

**Guthmann, Thomas; Baudach, Felix; Barz, Ines; Engelmann, Frank**

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

University of Applied Sciences

Carl-Zeiss-Promenade 2, 07743 Jena

E-Mail: [thomas.guthmann@fh-jena.de](mailto:thomas.guthmann@fh-jena.de); Internet: <http://www.fh-jena.de>

**Inhalt:** Mit modernen Simulations- und Berechnungsmethoden stehen dem Konstrukteur Werkzeuge zur Verfügung, mit welchen er die Möglichkeit hat, Bauteile bereits virtuell am Computer zu gestalten und zu analysieren. Trotzdem ist der Zeitaufwand für die Optimierung einzelner Geometrien im Entwicklungsprozess oft sehr hoch.

Gerade bei komplexen Bauteilen mit vielen Variationsparametern, lässt sich der Einfluss des einzelnen Parameters auf die zu optimierende Zielgröße kaum vorhersagen, so dass die Zusammenhänge mühevoll und zeitintensiv durch viele Simulationen oder Prototypen ermittelt werden müssen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird anhand der Gewichtsoptimierung einer druckbelasteten Platte ein beschleunigter Workflow zu einer effizienten und einfach zu fertigenden Bauteilstruktur aufgezeigt.

Im ersten Schritt erfolgt die Berechnung der optimalen Materialverteilung im Designraum mit Hilfe einer Topologieoptimierung. Auf der Basis dieser Ergebnisse wird im zweiten Schritt ein parametrisches CAD-Modell erstellt. Die Bestimmung der optimalen Kombination der Designparameter erfolgt anschließend mit Hilfe einer Parameteroptimierung.

**Abstract:** Using modern simulation and calculation methods, constructing engineers are able to design and analyze virtual components. Nevertheless optimization of individual geometries during the development process is often costly in terms of time.

Especially with complex components having many variation parameters, the influence of individual parameters is hard to predict. Therefore coherencies have to be determined in many laborious and time-consuming simulations or prototypes.

This work shows an accelerated workflow based on the weight optimization of a pressure-loaded plate.

Initially the calculation for an ideal material distribution is made by using a topology optimization. Based on these results a parametric CAD model will be created. The ideal combination of design parameters is obtained by parameter optimization.

**Stichwörter:** Optimierung, Leichtbau, FEM, Topologie

## 1 Einleitung

In der Vergangenheit lag der Fokus bei der Entwicklung von Bauteilen nicht immer vordergründig auf der Reduzierung der Bauteilmasse. Nur in wenigen, hoch spezialisierten Bereichen, wie der Luft- bzw. Raumfahrt wurde dem Leichtbau eine große Bedeutung zugewiesen.

Die steigenden Rohstoffkosten und der Trend zur Energieeinsparung führen dazu, dass Leichtbauteile für immer mehr Anwendungsbereiche entwickelt werden. Gerade in der Automobilindustrie ist dieser Trend deutlich zu sehen. Die einzelnen Hersteller sind bestrebt, durch konsequenten Leichtbau das Fahrzeuggewicht und damit auch den Energieverbrauch zu verringern und nebenbei die Fertigungskosten zu senken.

Gewichtsreduzierte Bauteile lassen sich nicht allein durch die Verwendung von Werkstoffen mit einer geringeren Dichte und einer hohen spezifischen Festigkeit realisieren. Effiziente Lösungen verlangen gleichzeitig eine Anpassung der Bauteilgeometrie an die wirkende Belastung und eine optimierte Fertigungsstrategie.

Besonders die Berechnung der optimalen Bauteilgeometrie stellt den Konstrukteur vor eine Herausforderung. Heutzutage existieren eine Vielzahl von Simulationsprogrammen, die eine hinreichend genaue Berechnung der Bauteilstrukturen ermöglichen.

Für die Auslegung bzw. Dimensionierung von komplexeren Bauteilstrukturen eignen sich die reinen Berechnungsprogramme jedoch nicht, da sie im Falle einer Strukturüberlastung keine Aussage über die notwendigen Verbesserungsmaßnahmen treffen können. An dieser Stelle ist dann die Erfahrung des Konstrukteurs gefragt. Er muss entscheiden, an welchen Stellen das Bauteil verändert werden muss, damit das Gewicht sinkt oder die zulässige Beanspruchung nicht überschritten wird. Bei komplexen Bauteilen mit mehreren Variationsparametern ist diese Entscheidung oftmals schwer zu treffen, da der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Bauteilstruktur selten vorhersagbar ist. Aus diesem Grund benötigt der Konstrukteur zusätzliche Optimierungswerkzeuge, die ihn bei der effizienten Gestaltung der Bauteile unterstützen.

## 2 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Workflow zur computergestützten Optimierung einer effizienten Leichtbaustruktur vorgestellt und erläutert. Als Basis dient hierfür eine einfache quadratische Aluminiumplatte mit fester Randeinspannung und einer gleichmäßigen Druckbelastung, die als Gussbauteil gefertigt werden soll.

Obwohl das Beispiel auf den ersten Blick trivial wirkt, erfordert die gewichtsmäßige Optimierung der Platte aufgrund des mehrachsigen Spannungszustandes einen erheblichen Aufwand. Zusätzlich stellt der dargestellte Workflow eine prinzipielle Lösungsstrategie für die Entwicklung von Gussleichtbauteilen dar, welche sich auch auf andere Problemstellungen anwenden lässt.

## 3 Lösungsmethoden

In der Praxis erfolgt die Optimierung von Bauteilen häufig nach dem trial and error - Prinzip. Dieses Verfahren ist jedoch sehr zeit- und kostenintensiv und die erzielbaren Ergebnisse sind in einem hohen Maß von der Erfahrung des Konstrukteurs abhängig. Es ist in der Regel jedoch davon auszugehen, dass das Optimum in der Praxis nicht erreicht bzw. gefunden wird.

Wissenschaftliche Optimierungsmethoden basieren hingegen auf der mathematischen Beschreibung der Problemstellung und der Suche nach den Extrempunkten der jeweiligen Optimierungsgröße (Zielfunktion), unter den gegebenen Randbedingungen. Bei der Entwicklung von Leichtbauteilen ist die Zielfunktion das Bauteilgewicht, welches es zu minimieren gilt. Damit die Masse des Bauteils nicht gegen Null tendiert, sind für diese Optimierung weitere Nebenbedingungen (Restriktionen) notwendig. So darf beispielsweise die maximal zulässige Werkstofffestigkeit nicht überschritten werden oder die zulässige Verformung ist begrenzt. Zusätzlich existieren meist weitere geometrische oder fertigungstechnische Restriktionen, die direkt oder indirekt auf die Zielfunktion einwirken.

Bauteile mit einfachen Querschnitten und Kraftverläufen, welche sich einfach analytisch berechnen lassen, können direkt mit Hilfe der beschreibenden Gleichung hinsichtlich einer Zielgröße optimiert werden [1]. Die Mehrzahl der Bauteile in der Praxis weist allerdings keine einfache Geometrie bzw. einen komplexen Kraftverlauf auf, so dass eine analytische Optimierung kaum möglich ist. Teilweise ist vom eigentlichen Bauteil zu Beginn

der Entwicklung nur der zur Verfügung stehende Bauteilraum (Designraum) mit den Krafteinleitungspunkten bekannt, in dem das Material relativ frei platziert werden kann.

In solchen Fällen muss zunächst eine prinzipielle Lösung für die gegebene Problemstellung gefunden werden, die der optimalen Lösung möglichst nahe kommt. Eine effektive Methode zur Festlegung der optimalen Materialverteilung im Designraum bietet das Verfahren der Topologieoptimierung. Grundlage dieses Verfahrens ist eine FE-Modellierung des gesamten Designraums, mit den Krafteinleitungspunkten als Randbedingungen. Die Steifigkeit der einzelnen  $K_i$  Elementzellen ist bei der Berechnung nicht mehr allein vom Material und der Zellengeometrie abhängig, sondern wird nach Gleichung 1 mit einer normierten Elementdichte  $\rho_i$  verknüpft.

$$K_i = \rho_i \cdot K_0 \tag{1}$$

Durch die Variation der Elementdichte von Werten zwischen nahe 0 und 1 lässt sich damit auch gleichzeitig die Steifigkeit und somit auch den Anteil der Lastaufnahme des einzelnen Elementes variieren. In einem iterativen Verfahren wird mit Hilfe von speziellen Algorithmen die Elementdichte für jedes einzelne Element so lange angepasst, bis sich das minimale Gewicht unter Einhaltung der Nebenbedingungen ergibt. Sinnvolle Nebenbedingungen ergeben sich aus den zulässigen Verformungen, den zulässigen Festigkeiten oder auch geometrischen Restriktionen.

Da in der Realität nur diskrete Materialverteilungen möglich sind (Zelle enthält Material oder nicht), sind im Optimierungsalgorithmus zusätzliche Korrekturfunktionen implementiert, die eine diskretere Materialverteilung erzwingen.

Das Ergebnis dieser Topologieoptimierung stellt die optimale Materialverteilung in Form der Elementdichte dar. In der Praxis hat sich gezeigt, dass in Bereichen mit einer Elementdichte  $\rho_i \geq 0,4$  Material benötigt wird und in Bereichen mit kleinerer Elementdichte nicht.

Kommerziell verfügbare Programme zur Topologieoptimierung bieten neben der eigentlichen Topologieoptimierung meist Funktionen zur gezielten Beeinflussung der Materialverteilung im Designraum. Beispielsweise kann die Austragungsrichtung definiert werden, damit keine Hinterschneidungen entstehen und sich das Bauteil in einer einfachen Gussform herstellen lässt.

Die so gewonnene Geometrie besteht im Regelfall aus Freiformflächen und lässt sich nur sehr schwer geometrisch beschreiben und fertigen. Um eine einfache und kostengünstigere Fertigung zu ermöglichen und eventuelle Spannungsspitzen abzubauen, werden die Freiformflächen durch geometrisch einfach zu beschreibende Körper ersetzt. Nachteil dieser Substitution ist, dass die so vereinfachte Geometrie von der optimalen Gestalt abweicht, wodurch sich das lokale Minimum der Zielfunktion verschiebt. Aus diesem Grund muss die vereinfachte Geometrie einen weiteren Optimierungsschritt durchlaufen, die sogenannte Parameteroptimierung.

Ziel der Parameteroptimierung ist die optimale Kombination der beschreibenden Modellparameter in Hinblick auf das Optimierungsziel zu finden.

Da die Suche nach den optimalen Parametern durch die Berechnung aller möglichen Kombinationen in der Realität nicht durchführbar ist, werden hierfür mathematische Such-, bzw. Berechnungsalgorithmen eingesetzt. Ein Überblick über die gängigsten Optimierungsalgorithmen mit ihren Vor- und Nachteilen liefern Schuhmacher [1] bzw. Harzheim [2].

Für die Optimierung von FE-Strukturen eignen sich besonders evolutionäre oder approximationsbasierte Optimierungsalgorithmen.

Evolutionäre Optimierungsalgorithmen suchen die optimale Parameterkonfiguration, indem sie sich an den Prozessen der natürlichen Evolution orientieren [1]. Zu Beginn der Optimierung werden mit Hilfe von zufällig generierten Parameterkombinationen einzelne Lösungen berechnet und ausgewertet. Anschließend werden die Parameter der vielversprechendsten Lösungen selektiert und neu miteinander kombiniert, wobei durch zufälliges Ändern einzelner Parameter neue Varianten, sogenannte Mutationen entstehen. Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis die neue Parametergenerationen gegenüber ihren Vorgängergenerationen keine Verbesserung aufweist und somit ein Optimum der Zielfunktion darstellen. Die Vorteile des Verfahrens liegen hauptsächlich im einfachen Aufbau und der hohen Flexibilität. Zudem benötigt der Algorithmus selbst keine mathematische Beschreibung des Modells.

Approximationsbasierte Optimierungsalgorithmen fußen hingegen auf Methoden der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments-DoE). Grundlegend bei diesen Verfahren ist die Entwicklung eines mathematischen Modells (Meta-Modell), welches den Zusammenhang zwischen den Designparametern und den Zielgrößen beschreibt.

Für die Approximation des Meta-Modells werden die Ergebnisse einzelner Parameterkombinationen aus der Gesamtheit aller möglichen Kombinationen mit Hilfe des FE-Modells berechnet und anschließend durch eine mathematische Funktionen miteinander verknüpft.

Die eigentliche Optimierung der Problemstellung erfolgt anschließend durch die Bestimmung der Extrempunkte des Meta-Modells über mathematische Ableitungen oder numerische Suchfunktionen [1].

Der Vorteil dieses Verfahrens besteht vor allem darin, dass gegenüber einer direkten Optimierung der Zielfunktion, deutlich weniger zeitaufwendige FE-Berechnungen notwendig sind. Zudem lassen sich mit Hilfe der Antwortfunktion sehr schnell Optimierungen mit veränderten Randbedingungen bzw. weiterführende Analysen (z. B. Robustheitsanalysen) durchführen. Die Genauigkeit der Approximation und damit auch der Optimierungsergebnisse hängt dabei wesentlich von der Anzahl der Stützstellen und dem Verlauf/Charakter der ursprünglichen Zielfunktion ab [3].

Zur Einsparung von Rechen- und Simulationszeit ist es bei einer größeren Anzahl an Designparametern sinnvoll, vor der eigentlichen Parameteroptimierung die wichtigsten Einflussparameter mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse zu bestimmen. Die anschließende Parameteroptimierung erfolgt nur für diese dominanten Parameter, da diese den größten Einfluss auf die Zielgröße haben. Designparameter mit einem geringen Einfluss auf die Zielgröße bzw. die Nebenbedingungen werden als konstant betrachtet. Aufgrund des exponentiellen Zusammenhangs zwischen Rechenzeit und Parameteranzahl lässt sich durch diesen Schritt die Optimierung deutlich beschleunigen, ohne dass sich das Ergebnis wesentlich verschlechtert.

## **4 Ergebnisse**

Ausgangspunkt der hier durchgeführten Gewichtsoptimierung bildet eine quadratische Aluminiumplatte mit einem Kantenmaß von 400 mm, auf die ein gleichverteilter Druck von 0,5 MPa wirkt. Bei einer zulässigen Vergleichsspannung von 150 MPa, muss die konstante Plattendicke unter den oben genannten Randbedingungen mindestens 12 mm betragen. Unter diesen Voraussetzungen weist die Platte ein Gewicht von 5,18 kg auf und die maximale Durchbiegung beträgt 1,41 mm.



Da die zulässige Vergleichsspannung bei einer Plattenhöhe von 12 mm bereits voll ausgenutzt ist, macht eine Gewichtsoptimierung nur Sinn, wenn die Plattendicke zumindest lokal erhöht werden darf. Aus diesem Grund besitzt der zugrunde gelegte Designraum für die optimierte Platte die Abmaße 400 mm x 400 mm x 30 mm (Breite x Tiefe x Höhe). Dies bedeutet, dass die maximale Plattendicke bis zu 30 mm betragen kann, wobei die minimale Plattendicke auf 5 mm beschränkt ist.

Die vorgestellte Methode der Topologieoptimierung dient zur Bestimmung der optimalen Materialverteilung im Designraum. Neben dem minimalen Bauteilgewicht als Optimierungsziel, wurde als zusätzliche Restriktion die Vergleichsspannung im optimierten Bauteil auf 150 N/mm<sup>2</sup> begrenzt. Weiterhin wird durch die Festlegung einer definierten Materialwachstumsrichtung sichergestellt, dass die optimierte Geometrie keine Hohlräume oder Hinterschneidungen aufweist und sich damit prinzipiell als Gussteil fertigen lässt.

Die Ergebnisse der Topologieoptimierung sind in Abbildung 1 dargestellt.

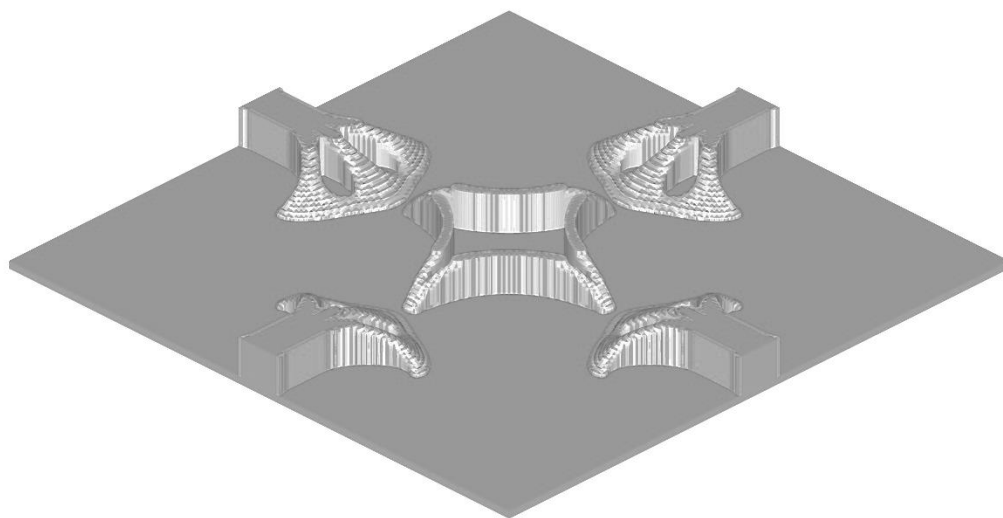


Abbildung 1: Materialverteilung bei der Referenzplatte nach Topologieoptimierung.

Die topologieoptimierte Platte besitzt eine Masse von rund 3,5 kg, bei einer maximalen Durchbiegung von 1,14 mm und einer maximalen Vergleichsspannung von 165 N/mm<sup>2</sup>, womit sie gegenüber der Ausgangsvariante um rund 32 % leichter ist.

Auf Basis der Ergebnisse der Topologieoptimierung wurde ein CAD-Modell erstellt, welches die Geometrie vereinfacht mit Hilfe von zehn unabhängigen Designparametern nachbildet. Anschließend erfolgte die Bestimmung der optimalen Designparameterkombination durch eine Parameteroptimierung.

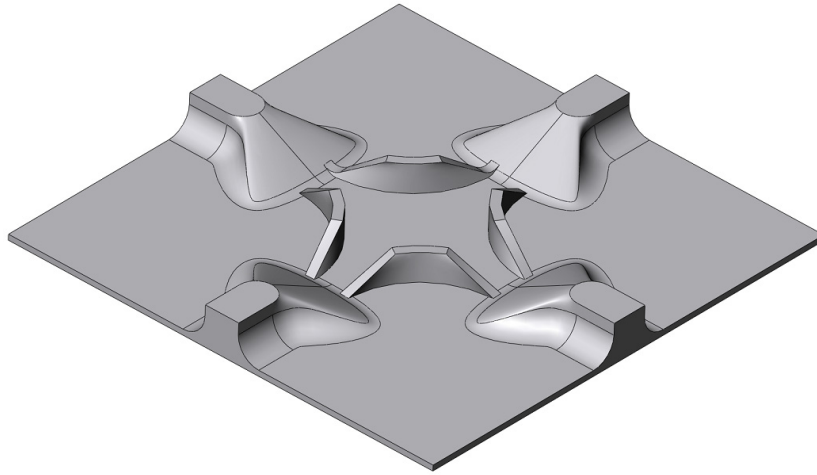


Abbildung 2: Auf Basis der Topologieoptimierung erstelltes CAD-Modell.

Für die Optimierung der zehn Designparameter wird die Adaptive Response Surface Methode (ARSM) genutzt [3]. Bei diesem Verfahren erfolgt die Suche nach dem globalen Minimum durch die Erstellung und schrittweise Adaptierung/Verfeinerung eines lokalen Meta-Modells, wie in Abbildung 3 dargestellt.

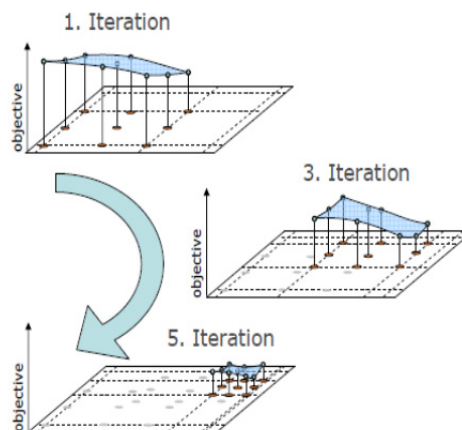


Abbildung 3: Erstellung und schrittweise Verfeinerung des Meta-Modells [3].

Im Vergleich zur Bestimmung der optimalen Parameterkombination über ein einziges, globales Meta-Modell ist dieses Verfahren genauer, benötigt allerdings mehr FEM-Berechnungen, wodurch es auch zeitaufwendiger ist.

Die Ergebnisse der einzelnen Optimierungsschritte sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Optimierungsschritte

|                                  | Ausgangsmodell        | Ergebnis<br>Topologieoptimierung | Ergebnis<br>Parameteroptimierung |
|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| maximale Plattendicke            | 12 mm                 | 30 mm                            | 30 mm                            |
| maximale Vergleichs-<br>spannung | 150 N/mm <sup>2</sup> | 164 N/mm <sup>2</sup>            | 150 N/mm <sup>2</sup>            |
| maximale Durchbiegung            | 1,41 mm               | 1,14 mm                          | 1,12 mm                          |
| Gewicht                          | 5,18 kg               | 3,5 kg                           | 3,68 kg                          |
| Gewicht in %                     | 100 %                 | 67,6 %                           | 71 %                             |

Der Vergleich der einzelnen Optimierungsergebnisse in Tabelle 1 zeigt, dass sich die Masse der Platte um rund 29 % verringern lässt. Dabei ist jedoch anzumerken, dass im Ergebnis der Topologieoptimierung die maximal zulässige Vergleichsspannung überschritten wird. Dies ist durch die interne Verarbeitung der Spannungsrestriktion begründet. Da der verwendete Algorithmus die Einhaltung der vorgegebenen Höchstspannung durch die Verwendung von sogenannten Straffunktionen überwacht [2], kann der vorgegebene Wert geringfügig überschritten werden, wenn sich hierdurch eine deutliche Verbesserung des Bauteilgewichts ergibt.

Der Gewichtsunterschied zwischen dem optimalen Ergebnis der Topologieoptimierung und dem der Parameteroptimierung ist durch die Vereinfachung der Geometrie zu erklären. Das Modell der Parameteroptimierung weicht von der idealen Form leicht ab, wodurch sich das Bauteilgewicht erhöht. Dafür ist das vereinfachte, parametrische Modell wesentlich einfacher zu fertigen.

## 5 Zusammenfassung

Im Projektverlauf konnte ein effizienter Workflow zur Gestaltung von gewichtsoptimierten Bauteilen anhand einer einfachen druckbelasteten Platte aufgezeigt werden. Zunächst wurde durch die Topologieoptimierung eine prinzipielle Lösungsmöglichkeit generiert. Aufbauend auf diesen Ergebnissen erfolgte die Erstellung eines parametrischen CAD-Modells mit einer anschließenden Parameteroptimierung.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Gewicht der Platte um rund 29 %, von 5,18 kg auf 3,68 kg gesenkt werden konnte.

Dieses Ergebnis stellt allerdings nicht das absolute Minimalgewicht der Platte dar. Durch die Änderung der Randparameter (maximale bzw. minimale Plattendicke) oder den

Einsatz eines Werkstoffs mit einer höheren spezifischen Festigkeit, ist eine weitere Gewichtssenkung realisierbar. Weiterhin ist es prinzipiell möglich, das CAD-Modell besser an die optimale Form anzupassen, wodurch das Bauteil jedoch komplexer und damit in der Fertigung teurer wird. Aus diesem Grund muss bei einer Optimierung immer ein Kompromiss zwischen dem technisch Möglichen und dem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand gefunden werden.

Da die computergestützte Optimierung noch am Beginn ihrer Entwicklung steht und der Bedarf an effizienten Bauteilen ständig steigt, ist in Zukunft auf diesem Gebiet mit einem Wachstum zu rechnen. Gerade im Bereich der Optimierungsalgorithmen besteht nach wie vor ein großer Entwicklungsbedarf. So ist derzeit kein einziger Algorithmus bekannt, der mit vertretbarem Aufwand und absoluter Sicherheit das globale Minimum einer Zielgröße finden kann, wenn gleichzeitig mehrere lokale Minima existieren.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Schumacher, Axel: *Optimierung mechanischer Strukturen* Grundlagen und industrielle Anwendung; 2. Auflage, Springer Vieweg Verlag 2013
- [2] Harzheim, Lothar; *Strukturoptimierung, Grundlagen und Anwendungen*, Verlag Harri Deutsch, 2008
- [3] Dynardo GmbH: *Methods for multi-disciplinary optimization and robustness analysis*; Bestandteil Optislang 4.1.2 Softwarepaket, 2014

# Optimierung der Zahnfußgeometrie von Stirnrädern durch den Einsatz FE-basierter Optimierungsmodelle im Verbund mit der Zahnkontaktanalyse

**Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, Dr.-Ing. Markus Brumm, Jonas Pollaschek M.Sc.**

Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

Steinbachstraße 19, 52074 Aachen

E-Mail: [j.pollaschek@wzl.rwth-aachen.de](mailto:j.pollaschek@wzl.rwth-aachen.de); Internet: <http://www.wzl.rwth-aachen.de>

## **Inhalt:**

*Mit der am Werkzeugmaschinenlabor entwickelten FE-basierten Zahnkontaktanalyse FE-Stirnradkette steht eine bewährte Methode zur Auslegung und Optimierung von Verzahnungen zur Verfügung. Durch eine vorgeschaltete Fertigungssimulation ist eine Berücksichtigung von fertigungsbedingten Verzahnungsabweichungen möglich. Die Modellierung der Verzahnung und der Radkörper mit Hilfe der Finiten Elemente erlaubt eine detaillierte Abbildung des Verlagerungs- und Verformungsverhaltens der Verzahnung unter Last. Mit der allgemeinen Zahnkontaktanalyse lassen sich neben den Standardverzahnungsfällen auch asymmetrische Verzahnungen untersuchen.*

*Ein neuer Ansatz soll die Vorteile der FE-basierten Zahnkontaktanalyse für die Geometrieoptimierung der Zahnfußkontur nutzbar machen. Der Vortrag stellt den Aufbau und die Vorteile des so entstehenden Programmsystems dar und diskutiert weitere Entwicklungspotentiale.*

## **Abstract:**

*The FE-based tooth contact analysis "FE-Stirnradkette", developed by WZL, delivers an established tool for designing and optimizing gears. Due to an upstream production simulation, deviations of the gear geometry coming from the manufacturing process can be taken into account during the design of the gear. By modeling the gear body in finite elements, the influence of displacements and deformations is considered in the tooth contact. As well as standard gear types, asymmetrical gear profiles can also be examined.*

*A new approach is to utilize the advantages of FE-based tooth contact analysis for tooth root geometry optimization. The paper presents the structure of the resulting program system and discusses further development potentials.*

**Stichwörter:** Zahnfußtragfähigkeit, Zahnfußspannung, Optimierung, Zahnkontaktanalyse, FEM, Gestaltoptimierung

**Keywords:** Tooth root load-carrying capacity, tooth root bending stress, optimization, tooth contact analysis, FEM, shape optimization

## 1 Einleitung

Stetig steigende Leistungsanforderung auf dem Gebiet der Getriebetechnik in Bezug auf Gewicht, Bauraum und Kosten sorgen für wachsenden Entwicklungsbedarf. Im Fokus steht dabei das Zahnrad als leistungsübertragendes Bauteil im Getriebe. Tragfähigkeitsoptimierte Verzahnungen können einen Beitrag dazu leisten, Gewicht, Bauraum und Kosten von Getrieben einzusparen. Daher werden Methoden benötigt, die es ermöglichen, Verzahnungen tragfähigkeitsoptimiert zu gestalten.

Konventionelle Auslegungsmethoden stützen sich auf genormte Verfahren zur Berechnung von Sicherheitsfaktoren gegen Versagen der Verzahnung durch Zahnbruch am Zahnfuß, sowie Fressen und Grübchenbildung auf der Zahnflanke [DIN87b, ISO07]. Die Tragfähigkeitsberechnung für den Zahnfuß nach DIN 3990-3 und ISO 6336-3 basiert auf Konventionen und Abstraktionen, die Voraussetzungen für ein normfähigen Ansatz sind. Eine Zahnfußgeometrie, die diesen genormten Bereich verlässt, kann nicht über diese Methode ausgelegt werden. Demnach ist es nur begrenzt möglich, tragfähigkeitsoptimierte Geometrien anhand der DIN 3990 und ISO 6336 auszulegen.

FE-basierte Methoden sind in der Lage, beliebige Verzahnungen hinsichtlich ihrer Geometrie so zu variieren, dass signifikante Tragfähigkeitssteigerungen in Simulation und Versuch erzielt werden können [BUES99, BROE05, ZUBE08]. Dies ermöglicht eine kleinere Dimensionierung der Zahnräder und damit das Erfüllen der oben genannten Anforderungen.

Dieser Bericht zeigt das Potential von vier Methoden zur Zahnfußgeometrieoptimierung, erläutert diese und gliedert sie anhand der verschiedenen Arten der Modellbildung.

### 1.1 Einflussgrößen auf die Zahnfußtragfähigkeit

Die Fußtragfähigkeit von Zahnrädern wird durch zwei wesentliche Faktorengruppen beeinflusst. Dies sind die geometrisch-funktionalen Faktoren und die werkstofftechnischen Faktoren. Die erste Gruppe umfasst geometrische Eigenschaften des Zahnrads, z.B. die Zahnbreite, Zahnflankenmodifikationen und die Zahnfußgeometrie, sowie einsatzspezifische Faktoren wie Verzahnungsabweichungen – beispielsweise durch Verschränkungen – und das Eingriffsverhalten der Zahnräder [ZUBE08]. Die zweite Gruppe umfasst technologisch-werkstoffspezifische Faktoren wie Härte und Einhärtetiefe, Werkstoff, Wärmebehandlung, Eigenspannungen, etc.. Eine Übersicht bietet Abbildung 1. [ZUBE08]

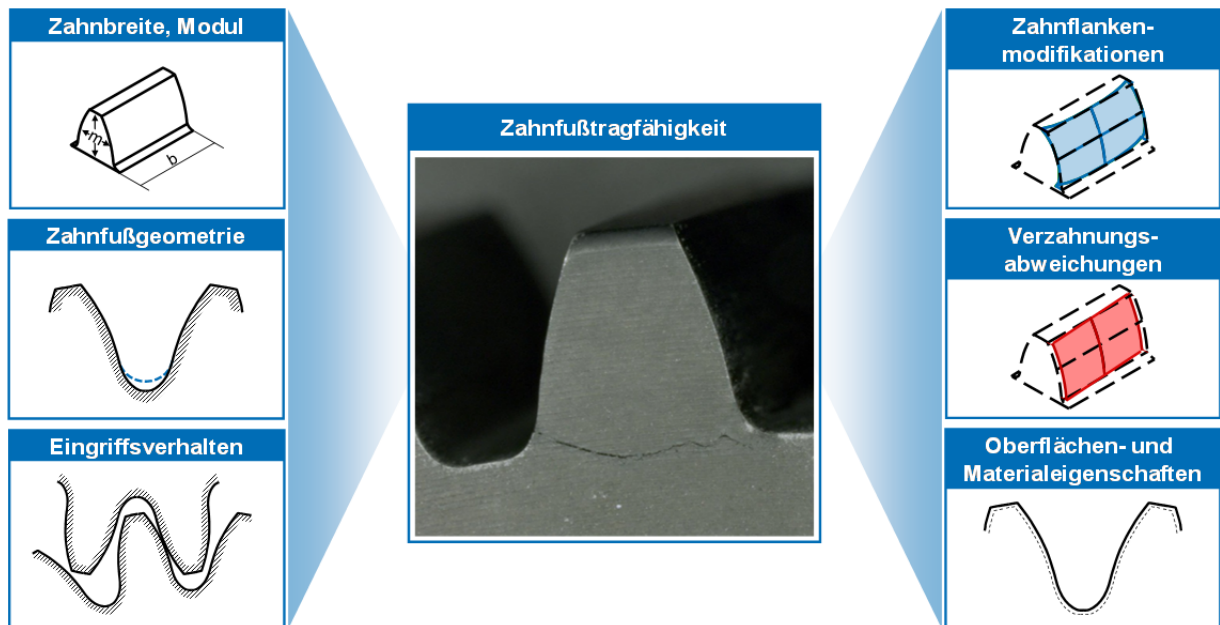


Abbildung 1: Einflüsse auf die Zahnfußtragfähigkeit

Die Zahnbreite hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Zahnfußtragfähigkeit. Ein breiter Zahn kann ein größeres Moment abstützen als ein schmaler, da sich das Flächenträgheitsmoment des belasteten Querschnitts erhöht. [ISO07]

Zahnflankenmodifikationen und Verzahnungsabweichungen können zu lokal erhöhten Spannungen im Zahnfuß führen. Dabei seien vor allem die Breitenballigkeit  $C_\beta$  und die Flankenwinkelmodifikation  $f_{H\beta}$  genannt. Diese führen zu einer über der Breite des Zahns lokal konzentrierten Kontaktkraft, die auch das Biegemoment am Zahnfuß lokal überhöht. Daher ist es notwendig bei der Berechnung der Zahnfußspannung auch die Zahnflankenmodifikationen zu berücksichtigen. [ISO07]

Das Eingriffsverhalten wirkt sich direkt auf die Höhe des Biegemoments im Zahnfuß und damit auch auf die Zahnfußspannung aus. Dabei haben Faktoren wie Anzahl der im Eingriff befindlichen Zähne, Höhe der Kontaktkräfte zwischen den Zähnen und Linienlastverteilung entlang der Zahnflanke einen erheblichen Einfluss. Ein hoher Überdeckungsfaktor ( $\varepsilon > 2$ ) sorgt beispielsweise für eine Aufteilung der Umfangskraft auf immer mindestens zwei Zähne. Dies führt zu einer dauerhaften Entlastung des Zahnfußes. [ISO07]

Werkstoff und Randschichteigenschaften haben ebenfalls einen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Zahnfußes. Die dauerhaft ertragbaren Spannungen sind von Werkstoff zu Werkstoff unterschiedlich. Auch die Art der Wärme- und Oberflächenbehandlung ist für die

Zahnfußtragfähigkeit entscheidend. Dabei werden u.a. Werkstoffe nach Kernfestigkeit, Oberflächenhärte, Einhärtetiefe und Qualität charakterisiert. [ISO07]

Die Zahnfußgeometrie hat schließlich einen signifikanten Einfluss auf die Zahnfußtragfähigkeit. Die Ausrundung im Zahnfuß wirkt als Kerbe, die einen entscheidenden Einfluss auf den Spannungszustand hat. Diese Geometrie ist jedoch in den Normberechnungen nach DIN 3990 und ISO 6336 nur durch den Fußrundungsradius  $\rho_F$  und die Zahnfußdickensehne  $s_F$  definiert. Die Zahnfußform kann gezielt auf einen geringeren Spannungszustand hin verändert werden. Dieser Bericht befasst sich mit Methoden, mit denen diese gezielte Optimierung der Zahnfußgeometrie durchgeführt werden kann. Dabei unterscheiden sich die Methoden in Ansatz, Aufwand, Flexibilität, Integrierbarkeit in den Fertigungsprozess und Potenzial der Tragfähigkeitssteigerung. [ZUBE08]

## **1.2 Potentiale der FE-basierten Zahnfußoptimierung**

Eine von Zuber durchgeführte Optimierung [BREC04] zeigt, welches Potenzial die gezielte Zahnfußoptimierung birgt, siehe Abbildung 2. Dargestellt sind ein Zahnprofil, dessen Kontur einem wälzenden Standardwerkzeug mit dem Kopfrundungsfaktor  $\rho_{aP0}^* = 0,2$  entspricht (Profil A), ein Zahnprofil entsprechend einem Werkzeug mit vollausgerundetem Kopf (Profil B) und eine gestaltoptimierte Zahnfußkontur (Profil C).

Bereits bei vollausgerundetem Kopf wird die berechnete Spannung um 10,5% gesenkt. Das optimierte Profil weist eine um 32,7% verminderte Spannung gegenüber Profil A auf. Die berechnete Zahnfußtragfähigkeit konnte je nach Material bzw. Wärmebehandlungsmethode um 40% (vergütete Zahnräder) bis 46% (einsatzgehärtete Zahnräder) gegenüber dem Grundprofil A gesteigert werden. Die Senkung der maximal auftretenden Zahnfußspannung und die Steigerung der Tragfähigkeit treten demnach in einer signifikanten Größenordnung auf. Dies konnte in Versuchen für vergütete Zahnräder durchgehend und für einsatzgehärtete Zahnräder teilweise bestätigt werden. Erwähnenswert ist die Diskrepanz zwischen experimentell nachgewiesener (+18%) und berechneter (+46%) Tragfähigkeitserhöhung der einsatzgehärteten Stirnräder. Dies führt Zuber auf die besonderen Eigenschaften der Randschicht durch die Einsatzhärtung zurück. [BREC04]

Die genannten Verbesserungen bei Zahnfußspannung und –tragfähigkeit führen zu dem Schluss, dass Zahnfußoptimierung in Simulation und Praxis erfolgreich angewendet



werden kann und ein hohes Potenzial birgt. Dieses Potenzial fertigungsnah nutzbar zu machen stellt ein Ziel für weitere Forschungsvorhaben dar.

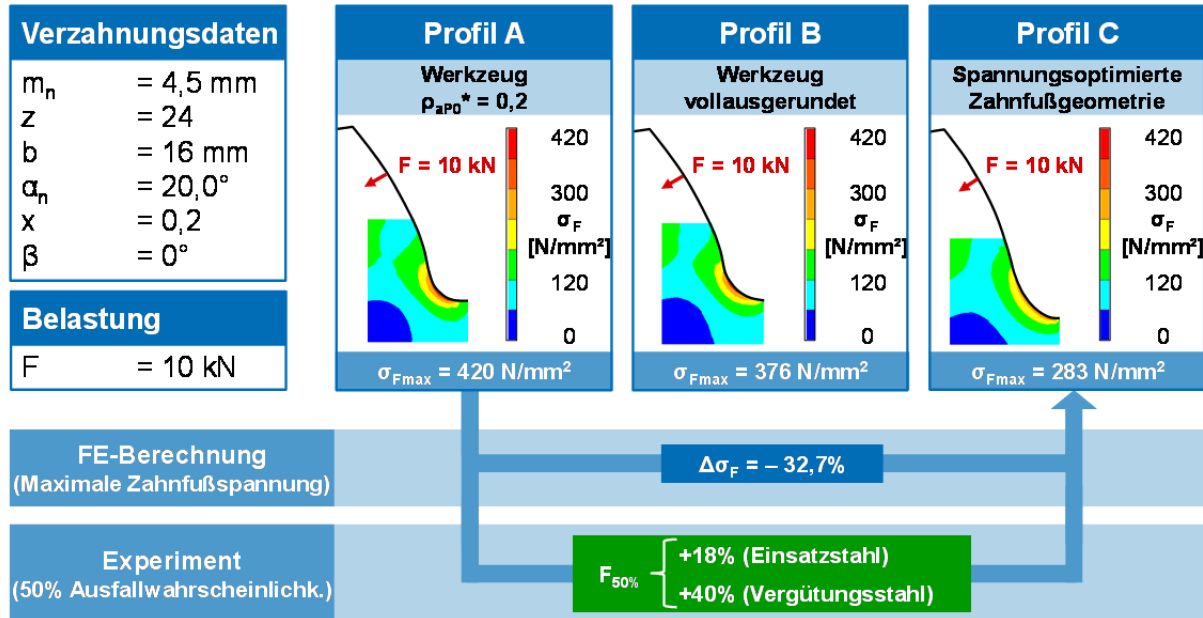


Abbildung 2: Potentiale der Geometrieoptimierung im Zahnfuß

## 2 Motivation und Zielsetzung

Der Berechnungsansatz zur Zahnfußtragfähigkeit nach ISO 6336-3 lässt nur begrenzte Möglichkeiten zur gezielten, tragfähigkeitsorientierten Zahnfußgestaltung von Stirnrädern. Die Fußausrundung kann über den Kopfhöhenfaktor  $h_{aP0}^*$  und den Kopfrundungsfaktor  $\rho_{aP0}^*$  des Werkzeugs beeinflusst werden. Eine gezielte Definition der Geometrie des Zahnfußes ist nicht möglich. Dies begrenzt die tragfähigkeitsoptimierte Auslegung des Zahnfußes. Hinzu kommt die bei zunehmender Abweichung der Verzahnung von konventionellen Formen wachsende Ungenauigkeit dieser nur innerhalb bestimmten Geometriegrenzen nutzbare Berechnungsmethode.

Die Ausführungen in Bezug auf die Zahnfußtragfähigkeitsoptimierung in Kapitel 1.2 zeigen das hohe Potenzial, das FE-basierten Optimierungsansätzen bieten. Das Ziel dieses Berichts ist es deshalb, verschiedene Methoden zur geometriegestützten Zahnfußoptimierung vorzustellen, einzuordnen und zu bewerten.

Die systematische Aufbereitung der einzelnen Methoden dient dazu, Entwicklungspotenzial in Hinsicht auf Geometrieoptimierung im Zahnfuß aufzuzeigen und Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschungsvorhaben zu schaffen.

### 3 Methoden zur Tragfähigkeitsoptimierung im Zahnfuß

In Kapitel 1.2 wird das Potenzial der Tragfähigkeitserhöhung durch Geometrieoptimierung im Zahnfuß dargelegt. Die Methoden, mit denen eine solche Tragfähigkeitserhöhung erreicht werden kann, werden in diesem Kapitel vorgestellt.

Zur besseren Differenzierbarkeit werden im Folgenden zunächst zwei Begriffe voneinander abgegrenzt. Die Begriffe Tragfähigkeit und Spannung sind nicht gleichwertig. Eine Spannungsreduktion ist nicht gleichzusetzen mit einer Tragfähigkeitssteigerung. Bei einer rein spannungsorientierten Zahnfußoptimierung werden andere Tragfähigkeitszugewinne erreicht, als bei einer gezielten Tragfähigkeitsoptimierung. Das zeigt Zuber in seiner Arbeit. Er führt dies auf verschiedene Effekte in der Randschicht des Werkstoffs zurück, die eine Spannungsreduktion unterschiedlich stark in einen Tragfähigkeitszuwachs umsetzen. [ZUBE08]

Aufgrund fehlender analytischer Ansätze zur Berechnung der Zahnfußspannung in Abhängigkeit beliebiger Zahnfußgeometrien wurde es erst mit dem Aufkommen numerischer, rechnergestützter Methoden wie der Boundary-Elemente- und der Finite-Elemente-Methode möglich, den Einfluss der Zahnfußgeometrievariation auf die auftretende Zahnfußspannung zu berechnen. Dies ermöglichte eine gezielte Optimierung der Zahnfußgeometrie in Hinsicht auf Spannung und Tragfähigkeit. Es werden nachfolgend vier verschiedene Methoden der FE-basierten, iterativen Zahnfußgeometrieoptimierung betrachtet.

#### 3.1 Gestaltoptimierung

Grundlage der Gestaltoptimierung ist ein Simulationsmodell (FE-Netz), welches aus dem Geometriemodell (CAD-Modell oder Zeichnung) erstellt wird. Dieses wird entweder durch direktes Verschieben der Knoten oder durch Aufbringen von Pseudolasten so verformt, dass verschiedene Grundgestalten entstehen. Bemerkenswert an dieser Methode ist, dass nicht nur die äußeren Knoten des Modells, also die eigentliche Kontur des Körpers durch aufbringen der Pseudolasten verändert werden, sondern auch die innen liegenden Knoten. So ist eine Optimierung durchführbar, die bei statischen inneren Knoten nicht erreichbar wäre. [BUES99]

Nachdem die Grundgestalten für die Optimierung gefunden sind, werden diese gewichtet kombiniert, um eine Endgestalt zu erreichen, die dann belastet und ausgewertet wird. Ausgehend vom Ergebnis der Belastungsrechnung entscheidet ein Optimierungsalgo-

rithmus, in welche Richtung die Gewichtungsfaktoren der Grundgestalten geändert werden müssen, um eine optimale Gestalt hinsichtlich der Problemstellung zu erreichen. Dieses Verfahren wird so oft wiederholt, bis ein Optimum gefunden ist. [BUES99]

Büßenschütt führt in ihrer Arbeit bereits eine Zahnfußoptimierung mit dem Ziel der Spannungsminimierung durch. Dabei nutzt sie vier Grundgestalten für den Zahnfuß. Die Berechnungsergebnisse nach der Optimierung liefern eine deutliche gesenkte Zahnfußspannung. Das geradverzahnte Stirnrad der Breite  $b = 16 \text{ mm}$ , des Moduls  $m_n = 5 \text{ mm}$  mit der Zähnezahl  $z = 23$  wurde statisch mit  $F = 20 \text{ kN}$  im äußeren Einzeleingriffspunkt belastet. Die Zahnfußspannung  $\sigma_F$  wird rechnerisch von  $627 \text{ N/mm}^2$  auf  $510 \text{ N/mm}^2$  gesenkt. Dies entspricht einer Verminderung der Zahnfußspannung um 20%. [BUES99]

### 3.2 Integriertes Verfahren nach Brömsen und Zuber

Brömsen greift Büßenschütts Ansatz der Gestaltoptimierung auf und erweitert das System um eine Tragfähigkeitsberechnung als Alternative zur reinen Spannungsberechnung [BROE05]. Diese Tragfähigkeitsberechnung wird von Zuber um einen dreidimensionalen Ansatz erweitert. Der Ansatz beruht auf dem Prinzip der örtlichen Dauerfestigkeit und dem Fehlstellenmodell nach Weibull [ZUBE08].

Zudem integriert er eine Fertigungssimulation, die es ermöglicht, anstelle der direkten Modifikation des FE-Netzes des Zahnrades durch Pseudolasten das Werkzeug auf diese Weise zu optimieren. So können durch wälzende oder profilierende Fertigungsverfahren herstellbare Zahnfußgeometrien optimiert werden. Den Kern des Systems bildet die Gestaltoptimierung nach Büßenschütt. Über diese wird beispielsweise die Kontur des Werkzeugs modifiziert, welches dann eine veränderte Zahnfußkontur erzeugt. Diese Kontur wird über die Finite-Elemente-Methode in ein Modell des Zahns überführt und ausgewertet. Ergebnis dieser Auswertung ist eine Zahnfußspannung, deren Betrag, sowie örtliche Ausdehnung als Eingangsgröße in das Tragfähigkeitsmodul einfließen. Dieses berechnet schließlich die Tragfähigkeit und deren Änderung gegenüber des Ausgangszustands. Der Optimierungsalgorithmus ändert ausgehend von diesen Informationen wiederum die Kontur des Werkzeugs und der Optimierungskreislauf beginnt von neuem. [ZUBE06]

### 3.3 Methode der radialen Verschiebungsvektoren

Kapelevich nutzt radiale Verschiebungen, um Punkte einer trigonometrisch approximierten Kontur so zu verschieben, dass die Zahnfußspannung minimale Werte annimmt. Die Kontur ist nicht eine vorausgelegte Zahnfußkontur, sondern die Spur eines Zahnes des Gegenrades mit Aufschlägen für das Kopfspiel und verschiedene Toleranzen. Kapelevich legt einen Kreis in die Kontur, dessen Mittelpunkt der Ursprung für die Verschiebungsvektoren bildet. Entlang dieser Vektoren werden die Punkte der trigonometrisch angenäherten Kontur verschoben. Durch diese Methode verringert Kapelevich die Zahnfußspannung um 21,4% gegenüber einer konventionell ausgelegten Geradverzahnung des Moduls  $m_n = 3,82$  mm mit der Zähnezahl  $z = 24$  und der Breite  $b = 2,54$  mm. [KAPE08]

Vorteil der Methode ist eine geringe Anzahl von Parametern. Jeder Punkt der Kontur ist durch die tangentielle Fixierung der Verschiebungsvektoren nur in eine Richtung beweglich.

### 3.4 Optimierung der Zahnfußgeometrie durch bionische Methoden

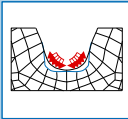
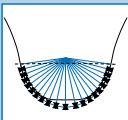
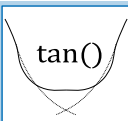
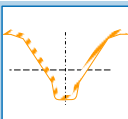
Roth nutzt eine Methode zur Geometrieoptimierung im Zahnfuß, die auf der Form bodennaher Stämme von Bäumen basiert. Er nutzt eine Tangensfunktion, um die Kontur eines Baumstammes anzunähern. Hierzu wird ein kartesisches Koordinatensystem in den Zahnfuß gelegt. Dabei schneidet die Y-Achse den Zahnfußmittelpunkt und die X-Achse den Übergangspunkt von der Zahnflankenevolvente zur Zahnfußkontur. Die Tangensfunktion wird in den zu optimierenden Zahnfuß gelegt und über verschiedene Übergangs- und Randbedingungen der Evolvente des Zahns angepasst. Dabei sollen Lage und Steigung der Tangensfunktion am Übergangsdurchmesser zur Evolvente gleich der der Evolvente sein. Zudem wird ein Steigungswinkel  $\gamma$  eingeführt, der die erste Ableitung der Tangensfunktion bei  $x = 0$  definiert. Ein Kreis mit Radius  $r$  und tangentialem Übergang zur Tangensfunktion formt den Zahnfußgrund. Die Parameter  $\gamma$  und  $r$  werden so lange iterativ variiert, bis eine maximale Tragfähigkeit gefunden ist. [ROTH13]

Roth senkt mit dieser Methode die Zahnfußspannung einer berechneten Verzahnung des Moduls  $m_n = 6,5$  mm mit der Zähnezahl  $z = 53$ , dem Eingriffswinkel  $\alpha_n = 20^\circ$  und der Profilverschiebung  $x = 0,4036$  um 30%. Die berechnete Zahnfußtragfähigkeit nach VDI 2737 wird um ca. 30% gesteigert. Pulsatorversuche mit der optimierten Verzahnung

bestätigten die berechneten Ergebnisse und zeigen eine Verbesserung der Tragfähigkeit von 34%. [ROTH13]

### 3.5 Bewertung der FE-basierten Optimierungsmethoden

Die vorgestellten Methoden zur Geometrieoptimierung im Zahnfuß werden im Folgenden in vier Kriterien qualitativ bewertet. Die Bewertung umfasst das Potenzial der Spannungsreduktion bzw. Tragfähigkeitserhöhung, Aufwand der Berechnung und Integrierbarkeit in den Produktentwicklungsprozess. Außerdem wird dargestellt, ob die jeweilige Methode die Zahnfußspannung ( $\sigma_F$ ) oder die Tragfähigkeit (Abkürzung „TF“) als Optimierungsziel besitzt, siehe Abbildung 3.

|  |   | TF oder $\sigma_F$    | Potenzial | Aufwand | Fertigungsintegration |
|--|---|-----------------------|-----------|---------|-----------------------|
| <b>Gestaltoptimierung</b><br>nach Büßenschütt        |   | $\sigma_F$            | ●         | ●       | ●                     |
| <b>Radiale Verschiebungen</b><br>nach Kapelevich     |  | $\sigma_F$            | ●         | ●       | ●                     |
| <b>Bionische Methode</b><br>nach Roth                |  | $\sigma_F$            | ●         | ●       | ●                     |
| <b>Integrierte Methode</b><br>nach Brömsen und Zuber |  | $\sigma_F$<br>+<br>TF | ●         | ●       | ●                     |

TF = Tragfähigkeit,  $\sigma_F$  = Zahnfußspannung

Abbildung 3: Bewertung der verschiedenen Optimierungsmethoden

Das integrierte Verfahren nach Brömsen und Zuber zeigt das höchste Potenzial der Tragfähigkeitssteigerung. Der eigens entwickelte Ansatz zur Tragfähigkeitsberechnung sagt die im Versuch zu erwartende Tragfähigkeit besser vorher als Tragfähigkeitsberechnungen nach ISO 6336-3 [BROE05, ZUBE08]. Zudem zeichnet sich der von Brömsen und Zuber verwendete evolutionäre Algorithmus durch seine Robustheit und Flexibilität aus. Die dem Modell zugrunde liegende Gestaltoptimierung nach Büßenschütt lässt eine geometrieunabhängige Parametrisierung der FE-Modelle zu [BUES99]. Trotz des höheren

Berechnungsaufwands stellt die integrierte Methode nach Zuber und Brömsen auf der Grundlage der Arbeit von Büßenschütt die umfangreichste und derzeit am besten geeignete iterative Optimierungsmethode für die Zahnfußgeometrie von Stirnrädern dar.

## **4 Zusammenfassung**

Der Berechnungsansatz nach ISO 6336-3 lässt nur begrenzte Möglichkeiten zur gezielten, tragfähigkeitsorientierten Zahnfußgestaltung von Stirnrädern. Aus diesem Grund wurden Methoden entwickelt, die mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode die Zahnfußkontur in Hinsicht auf minimale Spannung bzw. maximale Tragfähigkeit optimieren.

Die Methode von Brömsen [BROE05] und Zuber [ZUBE06] umfasst zwei verschiedene Optimierungsalgorithmen, ein flexibles Parametrisierungsmodell auf Basis der Gestaltoptimierung von Büßenschütt [BUES99] durch Grundgestalten, ein Modul zur Tragfähigkeitsoptimierung und einen Ansatz zur Fertigungsintegration auf der Basis von Geometrieoptimierung am Werkzeug. Diese Punkte werden so in keinem anderen Modell berücksichtigt. Die Integration von STIRAK stellt einen sinnvollen Schritt zur Aufwertung der Methode dar. STIRAK ermöglicht es, die Zahnfußspannung in Abhängigkeit des Zahneingriffs zu berechnen, wodurch Faktoren wie Zahnflankenmodifikationen, Wälzstellungen, gemessene Topografien und Wellenverlagerungen berücksichtigt werden können. Außerdem wird derzeit eine neue Zahnfußvernetzung entwickelt, die eine genauere Spannungsauswertung am Zahnfuß ermöglicht. Abbildung 4 zeigt das von Brömsen und Zuber entwickelte Optimierungssystem, welches um die Spannungsauswertung und die Fertigungssimulation der FE-Stirnradkette erweitert wurde.

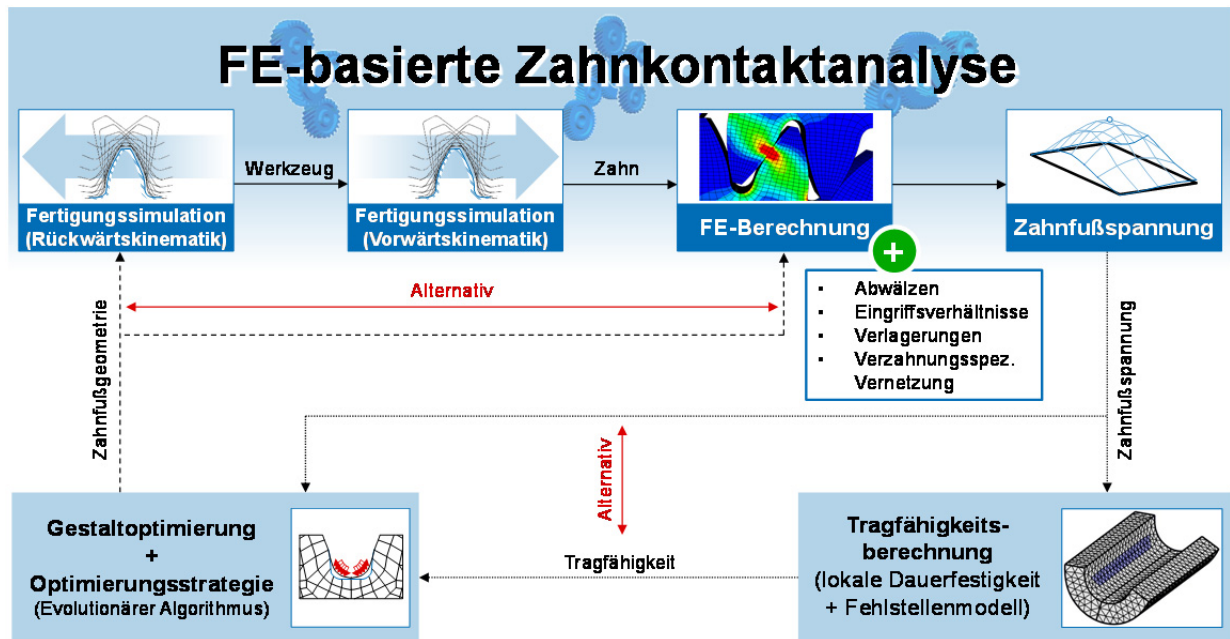


Abbildung 4: Programmsystem zur Zahnfußoptimierung unter Nutzung der FE-Stirnrackette

## 5 Literatur

- [BREC04] Brecher, C.; Klocke, F.; Zuber, D.:  
Zahnfußtragfähigkeits-Optimierung von einsatzgehärteten Zahnrädern.  
In: Tagungsband zur 45. Arbeitstagung "Zahnrad- und Getriebeuntersuchungen". WZL, RWTH Aachen, 2004
- [BROE05] Brömsen, O.:  
Steigerung der Zahnfußtragfähigkeit von einsatzgehärteten Stirnrädern durch rechnerische Zahnfußoptimierung. Berichte aus der Produktionstechnik.  
Dissertation, RWTH Aachen, Shaker, Aachen, 2005
- [BUES99] Büssenschütt, A.:  
Gestaltoptimierung zur funktions- und gussgerechten Auslegung komplexer Bauteile. Berichte aus der Produktionstechnik.  
Dissertation, RWTH Aachen, Shaker, Aachen, 1999

- [DIN87b] N.N.:  
DIN 3990 Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern.  
Beuth Verlag, Berlin, 1987
- [ISO07] N.N.:  
ISO 6336 Calculation of Load Capacity for Spur and Helical Gears.  
ISO, Genf, 2007
- [KAPE08] Kapelevich, A.; Shektman, Y.:  
Tooth Fillet Profile Optimization for Gears with Symmetric and Asymmetric Teeth.  
AGMA, Alexandria (VA), 2008
- [ROTH13] Roth, M.; Paetzold, K.; Roth, Z.:  
Development and experimental investigation of a bionic tooth contour.  
In: VDI-Berichte Nr. 2199, 2013, S. 1315–1326
- [ZUBE06] Zuber, D.:  
Optimierung der Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder unter Berücksichtigung von Fertigungsrandbedingungen.  
In: 1. Konferenz für Angewandte Optimierung in der virtuellen Produktentwicklung, Karlsruhe, 2006
- [ZUBE08] Zuber, D.:  
Fußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder unter Berücksichtigung lokaler Materialeigenschaften.  
Dissertation, RWTH Aachen, Shaker, 2008



## Vergleich der Auswirkungen auf den Designvorschlag durch Festigkeits- und Steifigkeitsoptimierung

Kevin Deese, Stefan Hautsch, Michael Frisch, Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth

E-Mail: kevin.deese@uni-bayreuth.de; Internet: <http://www.lscad.de>

**Inhalt:** Die Strukturoptimierung erfährt in der Industrie eine immer größer werdende Bedeutung. Ihre Anwendung kann dabei auf verschiedene Weise erfolgen. Eine Möglichkeit besteht in der Topologieoptimierung, die aus dem zur Verfügung stehenden Bauraum für ein Bauteil und den Randbedingungen ein für diesen Einsatz optimales Bauteil bzw. einen Designvorschlag erzeugt. Der Begriff „optimal“ ist dabei jedoch nicht eindeutig und kann je nach Vorgabe des Optimierungsverfahrens unterschiedlich ausfallen. Zwei Möglichkeiten stellen das OC-Verfahren als Vertreter der Steifigkeitsoptimierung und das SKO-Verfahren als Vertreter der Festigkeitsoptimierung dar. Beiden Verfahren liegen unterschiedliche Zielfunktionen zugrunde, weshalb auch die Optimierungsergebnisse differieren. Ein Vergleich soll zeigen, dass die Auswahl sowohl des Optimierungsverfahrens als auch der Optimierungsparameter einen großen Einfluss auf das Ergebnis hat und dementsprechend anwendungsorientiert erfolgen muss.

**Abstract:** Structural optimization becomes more and more important in the industry. Its application can occur in different ways. One of these ways is the topology optimization which uses the available space for a construction part and the boundary conditions in order to propose an optimum design for this specific task. However, the term “optimum” is not unambiguous and can result in different outcomes, depending on the choice of the optimization method. Two possible methods are the OC-method, as a stiffness optimization method, and the SKO-method, as stability optimization method. Both methods are based on different target functions because of which the results differ. A comparison shall show that the choice of both the optimization method and the optimization parameters has a large influence on the result and therefor has to be made application-oriented.

**Stichwörter:** Topologieoptimierung, SKO-Verfahren, OC-Verfahren

**Keywords:** topology optimization, SKO method, OC method

## 1 Strukturoptimierung

Die Optimierung mechanischer Strukturen – auch Strukturoptimierung genannt – gliedert sich in folgende Typen [1]:

- **Dimensionierung** (engl. sizing optimization) – Auslegung von Materialstärke bei gleichbleibender Geometrie
- **Formoptimierung** (engl. shape optimization) – Änderung der Form durch Verschiebung von Material bzw. Knoten im FE-Netz
- **Topologieoptimierung** (engl. topology optimization) – Erzeugung einer optimalen Topologie ausgehend von einem Bauraum durch Wegnahme von Material

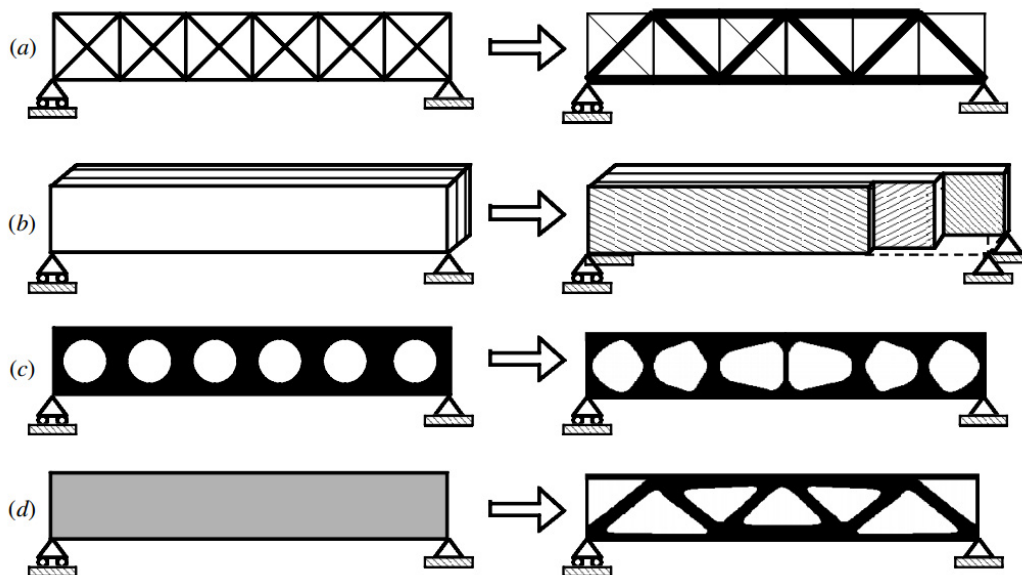


Abbildung 1-1: Optimierungstypen – (a) Dimensionierung, (b) Materialoptimierung, (c) Formoptimierung, (d) Topologieoptimierung [2]

Dimensionierung und Formoptimierung sind an eine weitestgehend fixierte Geometrie gebunden, während sich die Topologieoptimierung auf Grund ihrer gestalterischen Freiheit sehr gut als Werkzeug für den Formleichtbau eignet und entsprechend beliebt ist. Dabei gibt es verschiedenste Zielfunktionen, wobei hier vor allem die Festigkeits- und die Steifigkeitsoptimierung zu nennen sind.

## 2 Festigkeitsoptimierung

Die Festigkeitsoptimierung hat als Ziel, unter den gegebenen Randbedingungen das betrachtete Bauteil so zu optimieren, dass ein minimales Gewicht unter gleichzeitig hoher Festigkeit erzielt wird. Ein mögliches Verfahren dafür ist das SKO-Verfahren (Soft-Kill-Option), das auf der adaptiven biologischen Wachstumsregel basiert.

Diese begründet sich aus Beobachtungen aus der Natur, wonach beispielsweise Bäume an Stellen hoher Spannungen mit vermehrtem Wachstum reagieren und somit Spannungsspitzen abbauen sowie eine homogene Spannungsverteilung erreichen [3]. Ein weiteres Beispiel stellen Knochen dar, deren Gewebe durchgehend erneuert wird und, um sich veränderten Belastungen anzupassen, an Stellen hoher Spannungen stärker wächst und an Stellen niedriger Spannungen sogar entfernt wird [3, 4]. Daraus ergibt sich folgende Vorgehensweise:

1. Lagere Material an Stellen hoher Belastung an
2. Entferne Material an Stellen niedriger Belastung

Das SKO-Verfahren setzt die adaptive biologische Wachstumsregel ein, indem der aktuelle Elastizitätsmodul (E-Modul) der Finiten Elemente durch die Differenz der aktuellen Spannung und einer vorgegebenen Referenzspannung, multipliziert mit einem Skalierungsfaktor, verändert wird [1, 3]:

$$E_{i+1}^{(k)} = E_i^{(k)} + s \cdot (\sigma_i^{(k)} - \sigma_{ref}) \quad (2.1)$$

Dabei ist  $k$  das betrachtete Element,  $i$  die aktuelle Iteration,  $s$  der Skalierungsfaktor und  $\sigma_{ref}$  die Referenzspannung. Ist die aktuelle Spannung kleiner als die Referenzspannung, so ist das Element unterbelastet. Die Differenz wird dadurch negativ und der E-Modul verringert. Analoges gilt bei Überbelastung.

Der Skalierungsfaktor und die Referenzspannung sind in der Literatur nicht weiter beschriebene Einflussvariablen auf das Optimierungsergebnis, weshalb nach [5] verschiedene Variationen in Abhängigkeit der relativen Spannung oder der Referenzspannung untersucht worden sind. Daraus haben sich die folgenden zwei Beziehungen als bestmögliche Varianten erwiesen:

$$s(\sigma_{rel}) = \begin{cases} s_{min} + (s_{max} - s_{min})(\sigma_{rel} - 1)^2 & \text{für } \sigma_{rel} \leq 2 \\ s_{max} & \text{für } \sigma_{rel} > 2 \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\sigma_{ref}(t) = \sigma_{ref,min} + (\sigma_{ref,max} - \sigma_{ref,min}) \lg \left( 1 + 9 \cdot \frac{t-1}{n-1} \right) \quad (2.3)$$

Diese Relationen verdeutlicht Abbildung 2-1.

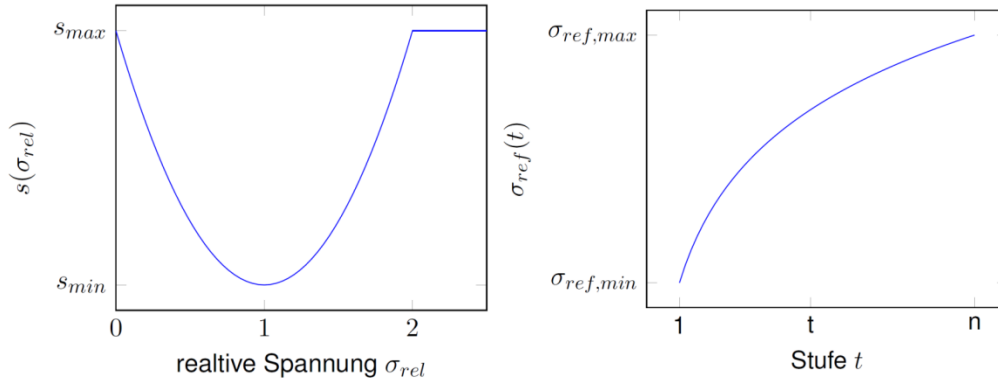


Abbildung 2-1: Variation des Skalierungsfaktors in Abhängigkeit der relativen Spannung (links),  
Variation der Referenzspannung (rechts)

Für den Skalierungsfaktor sind dabei der minimale und maximale Skalierungsfaktor  $s_{min}$  und  $s_{max}$ , sowie die relative Spannung  $\sigma_{rel} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{ref}}$  relevant. Die Referenzspannung wird in Abhängigkeit einer Stufe  $t$  im Laufe der Optimierung von einem minimalen Wert  $\sigma_{ref,min}$  zu dem eigentlich erlaubten Spannungswert  $\sigma_{ref,max}$  erhöht. Je höher die Anzahl der Stufen  $n$  ist, desto kleiner sind die Stufensprünge. Auf Grund des logarithmischen Verlaufs wird die Referenzspannung anfangs stärker erhöht als zum Ende der Optimierung. Daraus ergibt sich ein erweitertes SKO-Verfahren:

$$E_{i+1}^{(k)} = E_i^{(k)} + s(\sigma_{i,rel}^{(k)}) \cdot (\sigma_i^{(k)} - \sigma_{ref}(t)) \quad (2.4)$$

$$E_{i+1}^{(k)} = \begin{cases} E_{max} & \text{wenn } E_{i+1}^{(k)} > E_{max} \\ 0 & \text{wenn } E_{i+1}^{(k)} < 0 \\ E_{i+1}^{(k)} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.5)$$

### 3 Steifigkeitsoptimierung

Ein weiteres mögliches Optimierungsziel in der Topologieoptimierung ist die Maximierung der Steifigkeit  $K$  bzw. die Minimierung der Nachgiebigkeit  $C$ .

$$\min(C) = \min(\sum_{e=1}^{ne} E_e(x_e) \cdot \mathbf{u}_e^T \mathbf{K}_e^0 \mathbf{u}_e) \quad (3.1)$$

$$u. d. N.: \quad \mathbf{u} \text{ als Lösung von } \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (3.2)$$

$$V(x) \leq v^{rel} \cdot V_{ges}^0 \quad (3.3)$$

$$0 < x_e \leq 1 \quad (3.4)$$

$$0 < E_{min} \leq E_e(x_e) \leq E_e^0 \quad (3.5)$$

Dieses Ziel kann jedoch nur unter bestimmten Nebenbedingungen gelöst werden. Einerseits muss die Verschiebung  $u$  als Lösungsvektor aus der Finiten Elemente Analyse (FEA) integriert werden und andererseits benötigt der Algorithmus einen Startwert für den iterativen Prozess. Dafür ist es notwendig, eine Volumenrestriktion  $V(x)$  zu berücksichtigen. Schließlich wird festgelegt, dass die physikalische Dichte  $x_e$  einen Wert von „1“ (Finites Element mit vollem Material) nicht überschreiten darf sowie größer „0“ (Finites Element ist ein Loch) sein muss. Der als Optimierungsergebnis berechnete E-Modul  $E_e(x_e)$  darf wiederum nicht kleiner als der vorgegebene minimale E-Modul und nicht größer als der E-Modul des eigentlichen Ausgangswerkstoffes sein [1,6].

Zur Berechnung des E-Moduls existieren diverse Optimierungsansätze, z. B. Solid Isotropic Materials with Penalization (SIMP) oder Rational Approximation of Material Properties (RAMP), wobei es hierfür noch spezielle Erweiterungen gibt [7]. Der in der Literatur am häufigsten genannte und auch in kommerziellen Tools verwendete Ansatz ist der nach dem SIMP-Verfahren,

$$E_e = E_{min} + \rho_{e,rel}^p \cdot (E_e^0 - E_{min}) \quad (3.6)$$

weshalb sich die vergleichenden Untersuchungen darauf beziehen [1,8].

Dieser besitzt eine fest vorgegebene Schranke in Form eines minimalen E-Moduls  $E_{min}$ , um eine numerische Stabilität zu garantieren. Die physikalische Dichte eines finiten Elements  $\rho_{e,rel}$  bzw. die Designvariable  $x_e$  wird mit einem Bestrafungsfaktor  $p$  versehen, um eine scharfe 0-1-Verteilung im Finiten Element zu ermöglichen.

Die physikalische Dichte eines Finiten Elementes wiederum muss mit dem Optimierungsalgorithmus gelöst werden, um schließlich den E-Modul für die jeweilige Iteration zu berechnen.

$$\rho_{e,rel} = \frac{\rho_e}{\rho_e^0} = x_e \quad (3.7)$$

Ein mathematisches Verfahren zur Berechnung der Designvariablen ist das Optimalitätskriterien-Verfahren (OC) [1,7].

Die Herleitung des Optimalitätskriteriums erfolgt aus der Lagrange-Funktion des Optimierungsproblems. Diese ist eine mathematische Funktion, die die Zielfunktion mit den Nebenbedingungen in eine einzige Gleichung vereint. Durch die Ableitung der Lagrange-Funktion, zur Berechnung einer stationären Lösung, werden die Optimalitätskriterien bestimmt. Die Umformulierung des Optimierungsproblems ergibt folgende Fallunterscheidungen:

$$x_e^{i+1} = \begin{cases} \max(0, x_e - \alpha) & \text{für } x_e B_e^\eta \leq \max(0, x_e - \alpha) \\ x_e B_e^\eta & \text{für } \max(0, x_e - \alpha) < x_e B_e^\eta < \min(1, x_e + \alpha) \\ \min(1, x_e + \alpha) & \text{für } x_e B_e^\eta \geq \min(1, x_e + \alpha) \end{cases} \quad (3.8)$$

mit dem Vektor  $B$  aus der Optimalitätsbedingung

$$B_e = \frac{\frac{\partial C}{\partial x_e}}{\lambda \cdot \frac{\partial V}{\partial x_e}} = \frac{dC_e}{\lambda \cdot V_e^0} \quad (3.9)$$

In der Fallunterscheidung enthalten ist mit  $\alpha$  eine maximale Schrittweite für die Änderung der Designvariablen und mit  $\eta$  ein Dämpfungsfaktor, für den üblicherweise  $\eta = 0,5$  gilt. Der in  $B$  enthaltenen Lagrange-Multiplikator  $\lambda$ , muss so gewählt werden, dass die Volumen-nebenbedingung mit den neu berechneten Designvariablen eingehalten wird. Dieser Multiplikator lässt sich zuverlässig mit Hilfe einer Liniensuche wie z. B. der Bisektion ermitteln. Dabei wird der Faktor verkleinert, wenn die Volumenrandbedingung erfüllt ist, andernfalls vergrößert.

Ein häufig auftretendes Problem sind nach [9] numerische Instabilitäten bei der Steifigkeitsanalyse. Aus diesem Grund wird für die Lösung des Problems ein Sensitivitätsfilter in den Optimierungsablauf eingebunden [10].

## 4 Optimierungsmodell

### 4.1 Ausgangsbauteil

Das für den Vergleich der beiden Verfahren verwendete Bauteil ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Dabei handelt es sich um einen mit Hexaedern vernetzten Balken, der an der unteren linken und rechten Kante festgehalten wird. Die rechte Festhaltung stellt ein Festlager dar, die andere ein Loslager. In der Mitte der oberen Fläche wird eine Last von 50 N in negative y-Richtung aufgetragen. Der Ausgangselastizitätsmodul beträgt 206.000 N/mm<sup>2</sup> und die Querkontraktion 0,3.

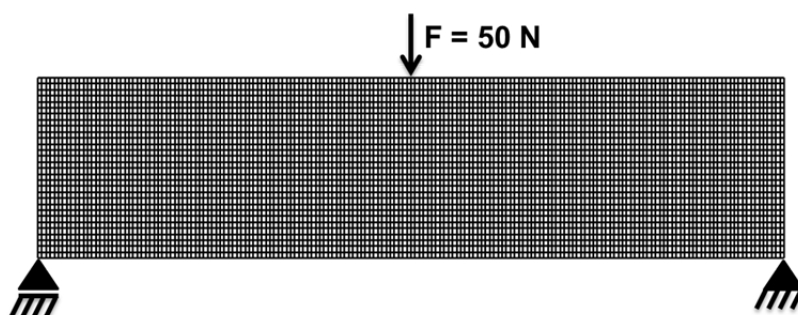


Abbildung 4-1: Ausgangsmodell für Optimierung

### 4.2 Parameter für Optimierungsverfahren

Entscheidend für eine „gute“ Topologieoptimierung ist die Wahl und Variation der Parameter des Optimierungsalgorithmus. Hierbei sind das Wissen und die Erfahrung des Anwenders von entscheidender Bedeutung, da jede Variation von Parametern ein anderes Optimierungsergebnis nach sich zieht, wie im Folgenden ersichtlich wird.

#### Festigkeitsoptimierung

Für die Optimierung mit dem SKO-Verfahren wird einerseits der maximale sowie der minimale Skalierungsfaktor ( $s_{\min} = 60$ ;  $s_{\max} = 600$ ) festgesetzt. Die minimale und maximale Referenzspannung wird andererseits bei den beiden Variationen verändert. In der ersten Variation beträgt die minimale Referenzspannung  $\sigma_{\min} = 30$  N/mm<sup>2</sup> und die Maximale  $\sigma_{\max} = 100$  N/mm<sup>2</sup>. Bei Variante 2 hingegen werden beide Werte halbiert, so dass sich  $\sigma_{\min} = 15$  N/mm<sup>2</sup> und  $\sigma_{\max} = 50$  N/mm<sup>2</sup> ergibt.

Dabei ist zu beachten, dass die Wahl der Parameter auf den Ausgangselastizitätsmodul abgestimmt ist. Die maximale Referenzspannung hat als Obergrenze die Streck-

grenze des verwendeten Materials und ist davon abhängig, wie hoch die eingeplante Sicherheit ist.

### Steifigkeitsoptimierung

Bei dem für die Steifigkeitsoptimierung erweiterten SIMP-Ansatz wird ein Bestra-  
fungsparameter, wie nach [1,6] empfohlen, von  $p = 3$  gewählt. Die maximale Schrittweite  
beträgt  $\alpha = 0,3$ , der Dämpfungsfaktor  $\eta = 0,5$ . Um eine Vergleichbarkeit der Simulationser-  
gebnisse zu gewährleisten, wird die Volumenrestriktion nach dem Optimierungsergebnis  
des SKO-Verfahrens gewählt. Hierbei wird das Volumen des konstruierten Bauteils be-  
stimmt und daraus das relative Volumen für die Steifigkeitsoptimierung abgeleitet. Für Va-  
riante 1 ergibt sich ein relatives Volumen von  $v^{\text{rel}} = 24,9 \%$  und für Variante 2  $v^{\text{rel}} = 39,9 \%$ .

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Optischer Vergleich der Optimierungsergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Topologieoptimierung des SKO-  
mit dem des OC-Verfahrens gegenübergestellt.

#### Festigkeitsoptimierung

Bei dem SKO-Verfahren bildet sich jeweils eine ähnliche Struktur aus, wobei bei der  
Simulation mit der höheren Referenzspannung ein Designvorschlag mit einer niedrigeren  
Masse bzw. Volumen resultiert, wie Abbildung 5-1 zeigt.

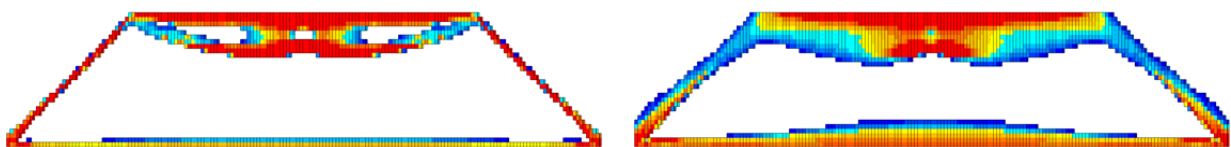


Abbildung 5-1: Optimierungsergebnis SKO-Verfahren: Variante 1 (links), Variante 2 (rechts)

Hervorzuheben ist weiterhin, dass in der Mitte der Krafteinleitung das meiste Mate-  
rial anlagert, wohingegen der Rand nur eine sehr dünne Struktur ausbildet. Bei Variante 2  
ist zu erkennen, dass viele Elemente enthalten sind, deren relativer E-Modul zwischen 0  
und 1 liegt, die also nicht eindeutig als festes Material oder als Loch zu erkennen sind.  
Hier bedarf es daher einer gewissen Interpretation bei der Nachkonstruktion.

#### Steifigkeitsoptimierung

Die Ergebnisse aus der Topologieoptimierung mit dem OC-Verfahren sind in Abbil-  
dung 5-2 dargestellt.



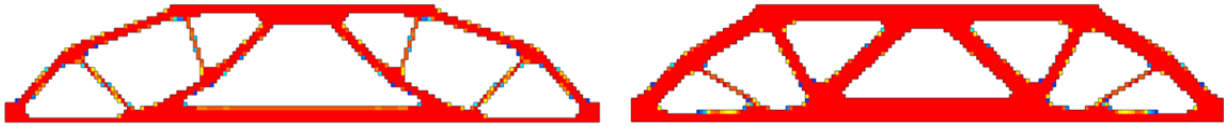


Abbildung 5-2: Optimierungsergebnis OC-Verfahren: Variante 1 (links), Variante 2 (rechts)

Hierbei hat sich eine Struktur mit Querstreben zwischen oberer und unterer Kante des Bauteils ausgebildet. Aufgrund der niedrigeren Volumenrestriktion ergeben sich bei Variante 1 filigranere Strukturen als bei Variante 2.

### Vergleich der Varianten

Werden die Simulationsergebnisse der beiden Verfahren gegenübergestellt, so stellt sich zwischen der Festigkeitsoptimierung und Steifigkeitsoptimierung ein völlig anderes Design dar. Ähnlich sind jeweils nur die Außenkonturen der Bauteile. Um dieses subjektive und nicht aussagekräftige Ergebnis bezüglich des Versagens des Bauteils unter Last zu quantifizieren, wird anschließend eine Finite-Elemente-Analyse der Designvorschläge durchgeführt.

## 5.2 Ergebnisse aus der Finiten-Elemente-Analyse

Nach einer Neukonstruktion des jeweiligen aus der Optimierung stammenden Designvorschlags werden die neuen Bauteile mittels einer statisch mechanischen Analyse auf Festigkeit überprüft (Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4).

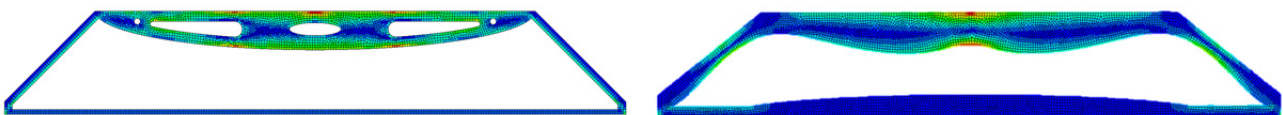


Abbildung 5-3: Spannungsplot Designvorschlag SKO-Verfahren: Variante 1 (links), Variante 2 (rechts)

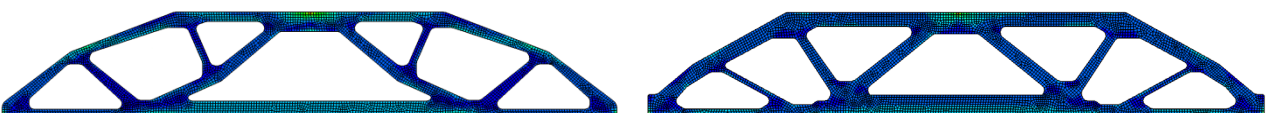


Abbildung 5-4: Spannungsplot Designvorschlag OC-Verfahren: Variante 1 (links), Variante 2 (rechts)

Jedoch muss angemerkt werden, dass sich aufgrund der Neukonstruktion des Optimierungsergebnisses eine leichte Erhöhung des Bauteilvolumens ergeben hat.

Die Ergebnisse (maximale Verschiebung und Elementspannung) der Simulationen sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst und gegenübergestellt.

Tabelle 5-1: Vergleich der Ergebnisse der statisch mechanischen Analyse

|                         | Maximale Verschiebung | Maximale Elementspannung |
|-------------------------|-----------------------|--------------------------|
| <b>Variante 1 (SKO)</b> | 0,36 mm               | 160 N/mm <sup>2</sup>    |
| <b>Variante 2 (SKO)</b> | 0,262 mm              | 158 N/mm <sup>2</sup>    |
| <b>Variante 1 (OC)</b>  | 0,0412 mm             | 63,3 N/mm <sup>2</sup>   |
| <b>Variante 2 (OC)</b>  | 0,0303 mm             | 57,1 N/mm <sup>2</sup>   |

Auffällig hierbei ist der große Unterschied zwischen dem SKO- und dem OC-Verfahren. Im Gegensatz zur Festigkeitsoptimierung ist die maximale Verschiebung der Steifigkeitsoptimierung um jeweils ca. das 8-fache, die der maximalen Spannung um das ca. 2,5-fache geringer.

Bei den Ergebnissen des SKO-Verfahrens ist zu sehen, dass die maximale Elementspannung die vorgegebene maximale Referenzspannung bei beiden Varianten stark überschreitet. Jedoch treten diese hohen Spannungen lokal auf und können unter Umständen durch eine anschließende Formoptimierung reduziert werden. Abgesehen von diesen lokalen Spannungsüberhöhungen befinden sich die restlichen Elementspannungen in dem Bereich der jeweils vorgegebenen Referenzspannung.

Die Ergebnisse des OC-Verfahrens weisen durch die Zielfunktion der maximalen Steifigkeit und die dadurch entstandenen Querstreben sehr geringe Verschiebungen auf. Auch die Spannungen befinden sich in einem moderaten Bereich. Geht man davon aus, dass die beim SKO-Verfahren angegebenen maximalen Referenzspannungen auch für die Optimierung mit dem OC-Verfahren gelten, dann werden diese eingehalten, und ein Versagen auf Grund mangelnder Festigkeit ist nicht zu erwarten. Bei Variante 1 wäre noch ein geringes Potential zur Materialeinsparung vorhanden, da die maximal erlaubte Spannung nicht erreicht wird. Dabei würde vermutlich die Steifigkeit nachlassen und die maximale Verschiebung erhöht werden.

## 6 Zusammenfassung

Die Strukturoptimierung bietet mit der Topologieoptimierung ein gutes Werkzeug für den Leichtbau von mechanischen Bauteilen. Je nach vorgegebener Zielfunktion kann damit die Steifigkeit oder die Festigkeit optimiert werden. Vorliegend wurden das SKO-Verfahren als Vertreter der Festigkeitsoptimierung und der SIMP-Ansatz zusammen mit dem OC-Verfahren als Vertreter der Steifigkeitsoptimierung verglichen.

Als Referenzbauteil wurde ein Balken verwendet, der an den unteren Ecken festgehalten und an der oberen Kante mittig mit einer Kraft belastet wurde. Das SKO-Verfahren liefert Ergebnisse mit relativ homogener Spannungsverteilung nahe der vorgegebenen Referenzspannung, jedoch lokal mit starken Überhöhungen. Die Verschiebungen belaufen sich auf einen viertel bis drittel Millimeter und sind bei entsprechender Anwendung nicht kritisch.

Das OC-Verfahren bringt Ergebnisse hervor, die sowohl geringere Verschiebungen als auch geringere Spannungen aufweisen. Da im Rahmen der Steifigkeitsoptimierung die Verschiebungen die relevante Endgröße darstellen, muss hier darauf geachtet werden, dass ein kritisches Maß nicht überschritten wird. Ein kleines Potential zur weiteren Spannungserhöhung und dadurch Materialeinsparung kann ausgenutzt werden, sofern dieses Maß eingehalten wird.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die unterschiedlichen Optimierungsmethoden mit ihren verschiedenen Zielfunktionen auch zu entsprechend unterschiedlichen Ergebnissen führen. Des Weiteren ist die Wahl der Parameter der Verfahren entscheidend für den Ausgang der Optimierung.

## Literatur

- [1] Harzheim, L.: *Strukturoptimierung – Grundlagen und Anwendungen*. Frankfurt a. M.: Harri Deutsch, 2008. – ISBN 978-3-8171-1809-0
- [2] Sigmund, O.: *Topology optimization - a tool for the tailoring of structures and materials*. In: Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 358, S. 211 - 227, 2000.
- [3] Mattheck, C.: *Design in der Natur – Der Baum als Lehrmeister*. 3. Aufl. Freiburg im Breisgau: Rombach, 1997. – ISBN 3-7930-9150-3
- [4] Raggatt, L.; Partridge, N.: *Cellular and Molecular Mechanisms of Bone Remodeling*. The Journal of Biological Chemistry 285, 2010, 25103-25108
- [5] Deese, K.: *Topologieoptimierung im Produktentwicklungsprozess – Softwarekonzeption mit dem SKO-Verfahren*. Masterarbeit am Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth, 2014
- [6] Schumacher, A.: *Optimierung mechanischer Strukturen – Grundlagen und industrielle Anwendungen*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-34699-6
- [7] Bendsoe, M.P.; Sigmund, O.: *Topology Optimization – Theory, Methods and Applications*. Berlin: Springer, 2003. – ISBN 3-540-42992-1
- [8] Anonymous: *TOSCA-Manual*. Version 7.0. Karlsruhe, 2009
- [9] Sigmund, O.; Petersson, J.: *Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedure dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima*. In: Structural and Multidisciplinary Optimization 16, S.68 -75. 1998
- [10] Sigmund, O.: *Morphology-based black and white filters for topology optimization*. In: Structural and Multidisciplinary Optimization 33, S. 401-424. 2007

## Ein Ansatz zur adaptiven Simulationsdatenerhebung

Thilo Breitsprecher, Christian Dingfelder, Sandro Wartzack

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg

Martensstraße 9, 91058 Erlangen

E-Mail: breitsprecher@mfk.fau.de; Internet: www.ktmfk.de

**Inhalt:** Der Herausforderung, durch möglichst wenig Simulationen oder Experimenten zu möglichst viel Information zu gelangen, wird in diesem Beitrag durch den Einsatz von Gaußprozessen begegnet. Durch dieses maschinelle Lernverfahren und mit den Simulationsdaten wird ein Vorhersagemodell trainiert, das die Berechnung einer lokalen Vorhersageungenauigkeit ermöglicht. Im Unterschied zur globalen Berechnung kann somit der Ort der höchsten Ungenauigkeit bestimmt und an dieser Stelle ein neues Trainingsdatentupel eingefügt werden. Dieses Vorgehen wird iterativ wiederholt. Eine exemplarische Anwendung zeigt den Nutzen dieser Methodik.

**Abstract:** Retrieving a maximum amount of information from a minimum number of simulations is a permanent challenge for design engineers. A gaussian process based approach is presented to meet this challenge. This machine learning methodology is capable of delivering both a prediction for a system's key parameter and a local value for the inaccuracy of this prediction. This property is used to iteratively derive the settings for each simulation run instead of fixing them in advanced by means of e.g. a full-factorial design of experiment.

**Stichwörter:** Wissensentdeckung in Datenbanken, Wissensbasiertes Konstruieren, Gaußprozesse

**Keywords:** Knowledge Discovery in Databases, Knowledge Based Engineering, Gaussian Processes

### 1 Problemstellung und Zielsetzung

Der Kernprozess aller ingenieurmäßigen Planungstätigkeiten in den Entwicklungsabteilungen moderner Unternehmen ist das Konstruieren und zwar unabhängig davon ob sie im Maschinen- und Anlagenbau, im Bereich Automotive oder in der Luftfahrtbranche vertreten sind. Das Arbeitsumfeld der Konstrukteure hat sich in den letzten Jahren jedoch stark gewandelt: Eine Studie des VDMA (Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau e. V.) zeigt, dass aufgrund der fortschreitenden Globalisierung der Märkte, dem steigenden Innovationsdruck und der erhöhten Individualität und Dynamik der einzelnen Absatzregionen, die Anforderungen an die Produkte immer differenzierter werden. Die Unternehmen müssen die Notwendigkeit erkennen, ihre Produkte und die damit verbundenen Produktentwicklungsprozesse an die neuen Anforderungen anzupassen.[6]

Simulationen und Experimente sind hierfür aus heutigen Entwicklungsabteilungen nicht mehr wegzudenken. Bei deren Planung bewegt sich der Konstrukteur ständig in einem Spannungsfeld. Auf der einen Seite ist das Ziel die Aussagefähigkeit einer Simulationsstudie zu maximieren, wofür tendenziell eine hohe Anzahl an Simulationen notwendig ist, um relevante Systemeingangsgrößen und deren Einfluss auf Systemausgangsgrößen zu detektieren. Gleichzeitig zwingt der allgemeine Kostendruck die Anzahl der Simulationen gering zu halten. Methodenkataloge wie die statistische Versuchsplanung unterstützen den Entwickler dabei, Versuchspläne mit fest vorgegebenen Parameterausprägungen aufzustellen. [8]

Der vorliegende Beitrag beschreibt einen alternativen Ansatz, bei dem der Versuchsplan nicht im Voraus festgelegt, sondern adaptiv für jede weitere Simulation angepasst wird. Ziel ist die Reduktion des gesamten Simulationsaufwands bei gleichbleibender Aussagekraft. Der Ansatz basiert auf dem Prinzip der Gaußprozesse, die dem maschinellen Lernen zugeordnet werden können. Ziel ist das Trainieren von Vorhersagemodellen auf der Basis experimenteller oder simulativer Daten (Trainingsdaten). Die Vorhersagemodelle repräsentieren konstruktionsrelevantes Wissen in Form von Formeln, Regeln oder Regressionsbäumen. Mit diesen kann der Konstrukteur beispielsweise das Verhalten eines Produktes in einer frühen Entwurfsphase abschätzen. [1, 10]

## **2 Der Einsatz von Gaußprozessen für das maschinelle Lernen**

Gaußprozesse können als mehrdimensionale Gaußverteilungen über unendlich viele Zufallsvariablen verstanden werden, wobei jede endliche Untermenge an Zufallsvariablen normalverteilt ist. Ein Gaußprozess ist als stochastischer Prozess durch eine Mittelwertfunktion ( $m$ ) und eine Kovarianzfunktion ( $k$ ) vollständig definiert, die im eindimensionalen Fall als Skalare abgebildet sind. Im Allgemeinen lässt sich für eine Funktion  $f$ , die durch einen Gaußprozess definiert ist, schreiben:  $f \sim GP(m, k)$ . Die Mittelwertfunktion spiegelt die Annahme über den generellen Verlauf der Funktion  $f$  (z. B. linear, quadratisch, exponentiell) wider, die Kovarianzfunktion beschreibt den Einfluss zweier Datentupel. Anhand eines Beispiels soll die Funktionsweise von Gaußprozessen kurz beschrieben werden. Ein beliebiger Gaußprozess sei wie folgt definiert:

$$m(x) = \frac{1}{4}x^2 \text{ and } k(x, x') = \exp\left(-\frac{1}{2}(x - x')^2\right) \quad (1)$$

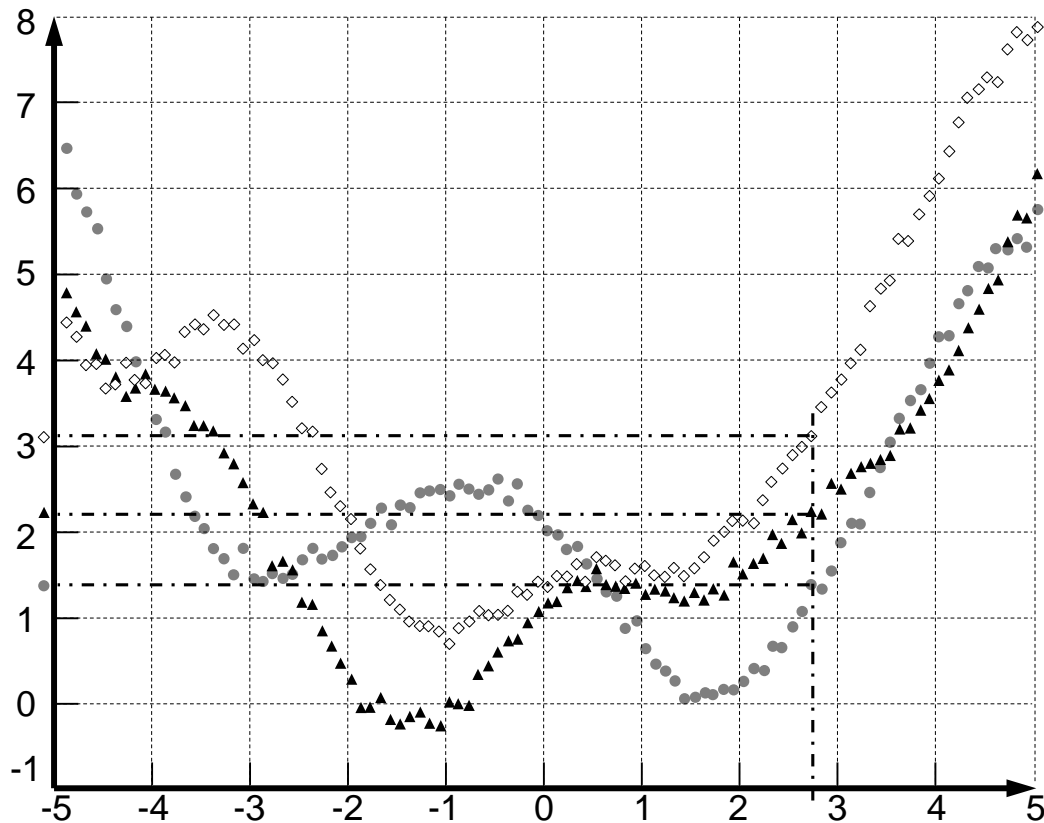


Abbildung 1: Drei Stichprobenverläufe eines Gaußprozesses werden an einer beliebigen Stelle (hier  $x_i = 2,8$ ) ausgewertet. Eine Auswertung an mehr Stellen ist möglich, darunter leidet aber die Darstellung.

Um das Verhalten des sich ergebenden stochastischen Prozesses darzustellen, werden  $n$  Stichproben an verschiedenen Stellen  $x_i$  gezogen und dargestellt. Das „zufällige“ Verhalten eines Gaußprozesses kann der oberen Gleichung nicht entnommen werden. Für  $n = 3$  ergibt sich Abbildung 1.

Obwohl leicht der Eindruck entsteht, es handle sich hierbei um drei Funktionsverläufe, sollten die drei Punktwolken nicht derart interpretiert werden. Treffender ist die Vorstellung von lokalen Gaußverteilungen (mit je  $n = 3$  Stichproben) an verschiedenen Stellen  $x_i$ . Für  $x_i = 2,8$  besteht diese lokale Verteilung aus den Werten  $f(x_i) = [1,4; 2,1; 3,1]$  und für größere Werte von  $n$  entsprechend aus mehr Einträgen. Das Trainieren eines Gaußprozesses mithilfe von Versuchs- oder Simulationsdaten beginnt mit der Festlegung eines sogenannten Priors aus Mittelwert- und Kovarianzfunktion. Dieser ist notwendig, um zu-

nächst Annahmen über die Eigenschaften eines stochastischen Prozesses zu treffen und zwar unabhängig von den Trainingsdaten. Der Verlauf der Punktwolken in Abbildung 1 lässt beispielsweise die Annahme zu, der zugrundeliegende Zusammenhang sei quadratisch. Durch das Training des Gaußprozesses wird aus dem Prior ein Posterior der die passende Mittelwert- und Kovarianzfunktion beinhaltet. Die Eigenschaften des Posteriors können durch sogenannte Hyperparameter beeinflusst werden. Wird im Sinne der Anschaulichkeit auf eine korrekte mathematische Formulierung verzichtet, so ist die zentrale Problemstellung beim maschinellen Lernen mit Gaußprozessen geeignete Werte für die Hyperparameter zu finden. [2, 5]

Wie lässt sich nun der Bezug zum allgemeinen maschinellen Lernen herstellen? Das Ziel des maschinellen Lernens lässt sich allgemein ausdrücken: Durch eine Parameterstudie mit  $z$  Durchläufen ergibt sich ein Simulations- oder Versuchsdatensatz  $D$  mit  $z$  Zeilen. Jede Zeile enthält eine Kombination der Eingangsparameter  $X$  sowie die sich für diese Einstellung ergebende Zielgröße  $Y$ .  $D = \{(X; Y) | i = 1, \dots, z\}$  ist somit das Trainingsdatenset und die Basis für ein zu trainierendes Vorhersagemodell  $F(X^*) = Y^*$ , mit dem für nicht in  $D$  enthaltene Parameterkombinationen  $X^*$  der zu erwartende Wert für die Zielgröße  $Y^*$  vorhergesagt werden soll. Eine solche Vorhersage mithilfe des Posteriors kann sich folgendermaßen vorgestellt werden: Unter der Annahme, dass die Trainingsdaten für den Gaußprozess in Bild 1 kein Datentupel an der Stelle  $x_i = 2,8$  enthalten haben, soll nun der Wert für  $f(x_i) = y^*$  vorhergesagt werden. Dieser Wert ergibt sich in diesem einfachen Beispiel durch das arithmetische Mittel aller Stichproben aus dem stochastischen Gaußprozess, also  $f(x_i) = \overline{[1,4; 2,1; 3,1]} = 2,2$ . Bei einer vollständigen Auswertung des Gaußprozesses an dieser Stelle, wird der Mittelwert jedoch nicht aus drei, sondern aus einer unendlichen Anzahl von Funktionswerten gebildet. Es ist zu erkennen, dass für andere Werte von  $x_i$  sich auch die vorhergesagten Werte für  $Y^*$  ändern. Neben der reinen Vorhersage des Funktionswerts (Mittelwert) lässt sich durch den Gaußprozess auch ein Konfidenzintervall angeben, in dem die Vorhersage liegt. Hierzu wird aus der Stichprobe die Standardabweichung berechnet, die wie der Mittelwert von  $x_i$  abhängt. Für das einfache Beispiel mit drei Stichproben ergibt sich eine Standardabweichung von  $\sigma_i = 0,85$ . Der zu erwartende Wert für  $Y^*$  wird also mit 68,3%-iger Wahrscheinlichkeit in einem Intervall von  $i = 1,27$  um den vorhergesagten Mittelwert liegen.



Dies ist als Vorhersagegenauigkeit oder Performanz des Vorhersagemodells zu interpretieren. Sinkt der Wert der Standardabweichung, so erhält der Konstrukteur durch den Gaußprozess eine verlässlichere Vorhersage für den Wert der Zielgröße. Im Gegensatz zu Vorhersagemodellen wie Regressionsbäumen, künstlichen neuronalen Netzen oder linearen Regressionsmodellen, deren Performanz durch eine Kreuzvalidierung [4, 11] global berechnet wird, erfolgt die Performanzbestimmung bei Gaußprozessen lokal: Für jedes  $x_i$  wird sich im gesamten Wertebereich der Systemparameter eine andere Genauigkeit (Standardabweichung  $\sigma_i$ ) ergeben. Diese Eigenschaft der Gaußprozesse wird im folgenden Ansatz für das adaptive Sampling genutzt.

### 3 Adaptive Versuchsdatenerhebung mithilfe von Gaußprozessen

Wie bei jedem Regressionsverfahren gilt auch für Gaußprozesse, dass die Vorhersagegenauigkeit steigt, wenn mehr Trainingsdaten zur Verfügung stehen. In der Nähe bereits gelernter Datentupel ist die Vorhersage genauer, mit steigendem Abstand sinkt sie. Zur Minimierung des allgemeinen Fehlers im Vorhersagemodell soll der Ort für einen neuen Trainingspunkt so gewählt werden, dass dieser den Fehler am stärksten verkleinert. In [7, 9] wird dieser Punkt dadurch bestimmt, dass die erwartete Reduzierung des Fehlers im System durch das Hinzufügen eines Punktes berechnet wird. Für das weitere Vorgehen wird der mittlere quadratische Fehler, engl. „mean square error“, kurz MSE, genutzt.

$$E_{MSE} = \underbrace{\sigma_{\hat{y}}^2}_{\text{Varianz}} + \underbrace{E_{\mathcal{X}}[(E_{\mathcal{T}}[\hat{y}(x)] - y(x))^2]}_{\text{bias}^2} \quad (2)$$

Der Erwartungswert  $E_{MSE}$  des MSE setzt sich aus der Varianz und dem  $\text{bias}^2$  zusammen. Der  $\text{bias}^2$  beschreibt die Abweichung des Erwartungswertes an der Stelle  $x$  von dem eigentlichen Wert  $y(x)$ . Unter der Annahme, dass das jeweilige untersuchte Modell korrekt ist, kann davon ausgegangen werden, dass der  $\text{bias}^2$  im Vergleich zur Varianz relativ klein ist. Um nun den MSE zu minimieren, also den Fehler im Modell zu minimieren, ist es das Ziel einen neuen Punkt, auch „query“ Punkt  $\tilde{x}$  genannt, zu bestimmen. Dieser „query“ Punkt wird so gewählt, dass die gesamte Modellvarianz des Erwartungswertes minimiert wird und somit die Vorhersage des jeweiligen Modells genauer wird. Für einen Gaußprozess berechnet sich die Kovarianz an einem neuen Punkt  $\tilde{x}$ :

$$\sigma_{\tilde{y}}^2(\tilde{x}) = K(\tilde{x}, \tilde{x}) - k(\tilde{x})K_N^{-1}k(\tilde{x}) \quad (3)$$

Hierbei wird von der a priori „Selbstkovarianz“  $K(\tilde{x}, \tilde{x})$  am Punkt  $\tilde{x}$ , das Produkt aus der Inversen der Kovarianzmatrix  $K_N$ , die durch die Trainingspunkte definiert wird, und der Kovarianz  $k(\tilde{x})$  zwischen den einzelnen Trainingsdaten  $x$  und dem „query“ Punkt  $\tilde{x}$  abgezogen. Wenn nun die Vorhersage der Varianz an einem neuen Punkt  $\tilde{x}$  bestimmt werden soll, wird die Kovarianzmatrix um diesen Punkt  $\tilde{x}$  erweitert, wodurch aus einer  $N \times N$  Matrix  $K_N$  eine  $(N + 1) \times (N + 1)$  Matrix  $K_{N+1}$  entsteht:

$$K_{N+1} = \begin{bmatrix} K_N & k(\tilde{x}) \\ k(\tilde{x})^T & K(\tilde{x}, \tilde{x}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Die Komponenten zur Berechnung der neuen Kovarianzmatrix  $K_{N+1}$  sind zum einen die ursprüngliche Kovarianzmatrix  $K_N$ , die Kovarianz  $k(\tilde{x})$  zwischen den alten Trainingsdaten und dem neuen „query“ Punkt  $\tilde{x}$ , sowie die a priori, oder auch Selbstkovarianz des Punktes  $\tilde{x}$ ,  $K(\tilde{x}, \tilde{x})$ . Die erwartete Änderung der Varianz im gesamten Modell wird immer bezüglich eines Referenzpunktes  $\xi$  berechnet. Es wird die Varianz an einem Referenzpunkt  $\xi$  betrachtet und die Veränderung der Varianz an diesem Punkt durch das Hinzufügen von unterschiedlichen „query“ Punkten  $\tilde{x}$  zu den Trainingsdaten berechnet. Die Änderung der Varianz am Referenzpunkt  $\xi$  durch Hinzufügen eines „query“ Punktes  $\tilde{x}$  ist:

$$\Delta\sigma_{\hat{y}(\xi)}^2(\tilde{x}) = \sigma_{\hat{y}(\xi)}^2 - \sigma_{\hat{y}(\xi)}^2(\tilde{x}) = \frac{(k(\xi)^T K_N^{-1} k(\tilde{x}) - K(\tilde{x}, \xi))^2}{(K(\tilde{x}, \tilde{x}) - k(\tilde{x})^T K_N^{-1} k(\tilde{x}))} \quad (4)$$

Die Differenz der Varianz setzt sich aus der Differenz der ursprünglichen Varianz am Punkt  $\xi$  und der Varianz am Punkt  $\xi$  mit den um  $\tilde{x}$  erweiterten Trainingsdaten zusammen. Der Kovarianzvektor  $k(\xi)$  ist die Kovarianz zwischen den Trainingsdaten  $x$  und dem Referenzpunkt  $\xi$ . Die Variable  $K(\tilde{x}, \xi)$  beschreibt die Kovarianz zwischen dem Referenzpunkt  $\xi$  und dem „query“ Punkt  $\tilde{x}$ . Anhand der dargestellten Gleichung (4) kann die Differenz der Varianz auch mit relativ einfachen Mitteln berechnet werden. Lediglich die Inverse der Kovarianzmatrix  $K_N$  ist aufwändiger zu bestimmen und erfordert die Implementierung einiger Matrizenoperationen, bspw. in MATLAB.

Es ist zu erkennen, dass zwei Punkte für das adaptive Sampling festgelegt werden müssen. Dies sind zum einen der Referenzpunkt  $\xi$  an die Veränderung der Varianz beobachtet werden soll und zum anderen der „query“ Punkt  $\tilde{x}$ , der zu den Trainingsdaten hin-

zugefügt wird und die Veränderung der Varianz an dem Punkt  $\xi$  hervorruft. Eine einfache Wahl ist an dieser Stelle der Punkt mit der höchsten Vorhersageungenauigkeit (Varianz) im gesamten Modell. Die „query“ Punkte  $\tilde{x}$  werden mit Hilfe eines Latin Hypercube Samplings (LHS) [3] erzeugt, damit diese sich gleichmäßig im gesamten Versuchsraum verteilen und somit alle Möglichkeiten für neue Punkte abdecken.

#### 4 Anwendung des Verfahrens für eine FEM-Simulationsstudie

Für die Demonstration des adaptiven Samplings wird ein Modell herangezogen, welches die Kontaktspannung zwischen den Zähnen einer Synchronring-Sperrverzahnung und der Schiebemuffe (Abbildung 2) während des Schaltvorgangs simuliert. Das FE-Modell ist vollständig parametrisiert, so dass die Modell- bzw. Systemparameter (Zahngeometrie) variiert und deren Einfluss auf die Zielgröße (Kontaktspannung) im Rahmen von Simulationsstudien erfasst werden können. Von den 18 Geometrieparametern werden die Größen Dachwinkel, Kontaktflächenlänge, Fasenwinkel und Überlappung der Zähne für diesen Anwendungsfall als zu untersuchende Parameter festgelegt.

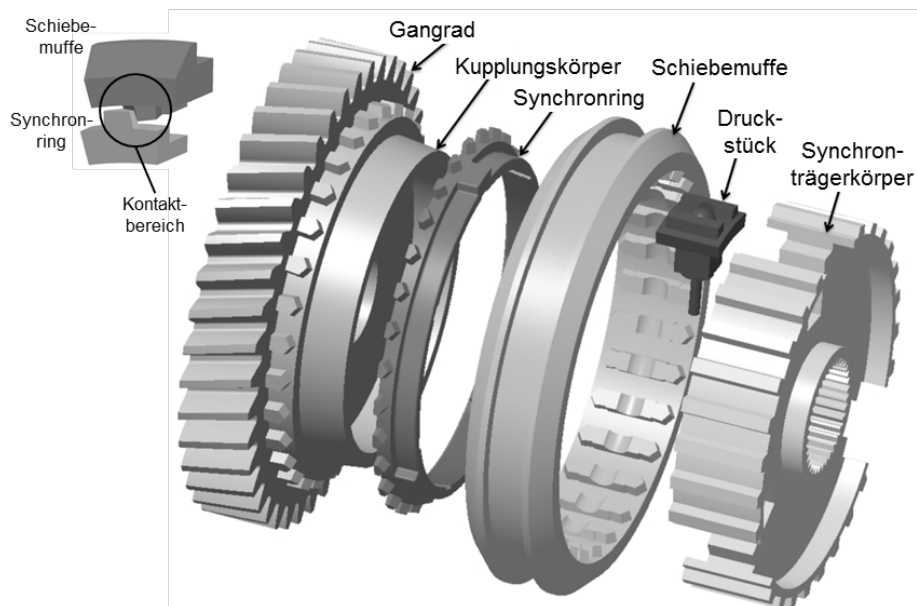


Abbildung 2: Explosionsdarstellung einer Synchronereinheit mit vergrößertem Kontaktbereich der Zähne zwischen Schiebemuffe und Synchronring

Für diese Systemparameter wird zunächst ein LHS-basierter Versuchsplan mit 100 Versuchen aufgestellt und die auftretende Kontaktspannung für all diese Einstellungen ermittelt. Mit diesem Trainingsdatensatz wird ein Referenzgaußprozess trainiert und des-

sen Vorhersagegenauigkeit über eine zehnfache Kreuzvalidierung bestimmt. Als Fehlerkennwert wird die Wurzel des mittleren Fehlerquadrats genutzt. Auf die Kreuzvalidierung wird an dieser Stelle zurückgegriffen, da dies die robusteste Methode ist, um die Performanz eines Vorhersagemodells zu bestimmen [11]. So ergibt sich für den Referenzgaußprozess eine Vorhersagegenauigkeit von  $32 \frac{N}{mm^2}$ .

Als Grundlage für das adaptive Sampling dient ein LHS-Versuchsplan mit 10 gleichverteilten Versuchspunkten und unterschiedlichen Einstellungen für die vier oben genannten Geometrieparameter. Basierend auf diesem Datensatz werden 90 weitere Datentupel entsprechend des im Kapitel 3 beschriebenen Vorgehens hinzugefügt. Nach jeder Iteration wird für den jeweiligen Gaußprozess die Performanz durch eine zehnfache Kreuzvalidierung bestimmt und in ein Diagramm (Abbildung 3) eingetragen.

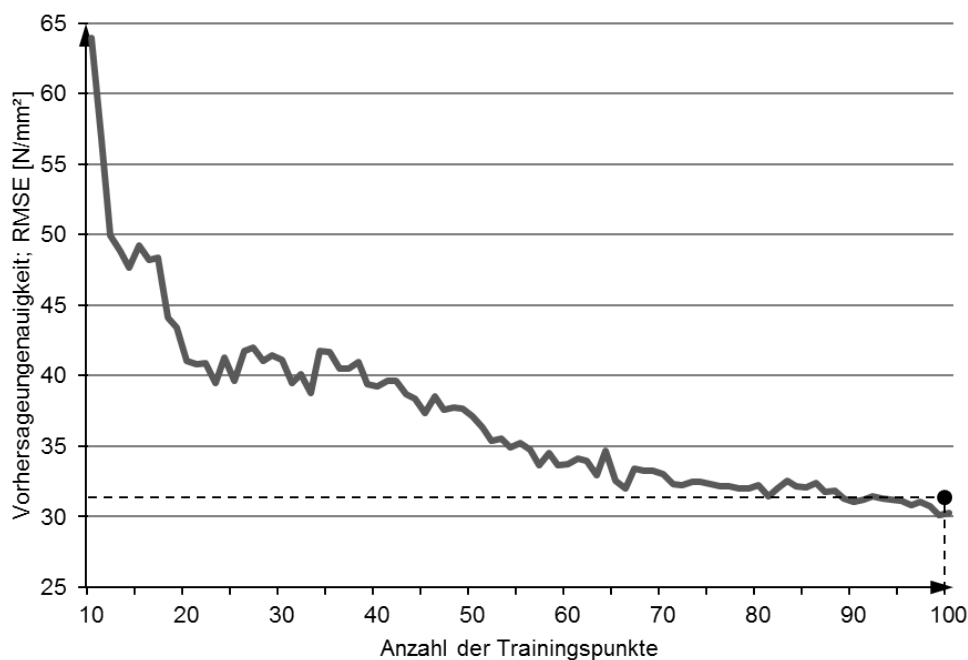


Abbildung 3: Verlauf der durch eine Kreuzvalidierung geschätzten Vorhersagegenauigkeit der adaptiv gesampelten Gaußprozesse (Kurve) und die des 100-LHS Referenzgaußprozesses (Punkt).

Das Ergebnis kann folgendermaßen interpretiert werden: Zum einen liefern 100 adaptiv erzeugte Trainingsdatentupel (also 10+90) einen Gaußprozess mit einer um ca. 5% verbesserten Vorhersagegenauigkeit ( $30,1 \frac{N}{mm^2}$ ), zum anderen erreichte der adaptive Gaußprozess bereits nach ca. 80 Simulationen (also 10+70) die gleiche Vorhersagegenauigkeit wie der nicht-adaptive Referenzgaußprozess nach 100 Simulationen. Es ließe

sich somit in diesem Fall der Versuchsumfang um ca. 20 Simulationen reduzieren, was vor allem bei umfangreichen Rechnungen zu Zeit- und Kostenersparnissen führt.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der in diesem Beitrag gezeigte Ansatz kann Produktentwickler und Konstrukteure bei der Ausführung von experimentellen oder simulativen Parameterstudien unterstützen, indem der Informationsgewinn pro Analyseschritt maximiert wird. Im Gegensatz zu deterministischen Werkzeugen wie voll- oder teilfaktoriellen Versuchsplänen werden die Einstellungen des zu simulierenden Systems vor jeder weiteren Simulation (adaptiv) festgelegt. Basis der präsentierten Forschungsarbeiten sind Gaußprozesse, die im Rahmen des maschinellen Lernens eingesetzt werden können. Ziel eines solchen Lernprozesses ist die Vorhersage von Zielgrößen auf der Basis eines Trainingsdatensatzes. Es konnte gezeigt werden, dass die Vorhersagegenauigkeit durch adaptive Versuchsdatenerhebung verbessert bzw. eine gleichwertige Vorhersagegenauigkeit mit weniger Simulationen erreicht wurde. In weiterführende Arbeiten wird zum einen der Einsatz von Gaußprozessen für das maschinelle Lernen verbessert. Insbesondere bei der Auswahl des Priors kann der Benutzer mehr Unterstützung erfahren und bessere Ergebnisse erzielen. Weiterhin müssen Gaußprozesse für die Verarbeitung diskreter Systemparameter (z. B. Werkstoffklassen, Stufeneinstellungen) werden, was ihr Einsatzgebiet noch weiter vergrößert.

### Danksagung

Die Autoren danken der DFG für die Förderung des Teilprojekts B1 „Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems“ im Rahmen des SFB/TR73 sowie Herrn Andreas Meinel, M.Sc., für die Unterstützung bei den hier vorgestellten Arbeiten.

### Literatur

- [1] Breitsprecher, T., Wartzack, S., “Architecture and realization of a self-learning engineering assistance system for the use within sheet-bulk metal forming”, Proceedings of the 9th Norddesign, Kyvsgård Hansen, P.; Rasmussen, J.; Jørgensen, K. A.; Tollestrup, C. (Hrsg.), Aalborg University, Dänemark, 2012, S. 79-86.
- [2] Breitsprecher, T.; Kestel, P.; Dingfelder, C.; Wartzack, S.: Gaussian Process based approach for automatic knowledge acquisition. Proceedings of the 13th International Design Conference 2014, S. 1733-1740.

- [3] Iman, R. L.: *Latin Hypercube Sampling*. Everitt, B. S.; Melnick, E. L. (Hrsg.): Encyclopedia of Quantitative Risk Analysis and Assessment. John Wiley & Sons: Hoboken, 2008.
- [4] Küstner, C.; Breitsprecher, T.; Wartack, S.: *Die Auswirkung der Reihenfolge von Mess- und Simulationsdaten auf das Ergebnis der Kreuzvalidierung in KDD Prozessen*. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartack, S. (Hrsg.): Design for X - Beiträge zum 24. DfX-Symposium 2013, 19.-20. September 2013, Jesteburg, 2013, S. 175-186.
- [5] Rasmussen, C. E.; Williams, C. K. I.: *Gaussian Processes for Machine Learning*. The MIT Press, Massachusetts (USA), 2006.
- [6] Schuh, G.; Schmidt, A.; et al: *Effizient, schnell und erfolgreich: Strategien im Maschinen- und Anlagenbau*. Frankfurt am Main: VDMA Verlag, 2007, ISBN: 978-3-8163-0536-1.
- [7] Seo, S.; Wallat, M.; Graepel, T.; Obermayer, K.: *Gaussian process regression: Active data selection and test point rejection*. Mustererkennung 2000. Springer: Berlin Heidelberg, 2000, S. 27-34.
- [8] Siebertz, K.; Bebbler, D.; Hochkirchen, T.: *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2010, ISBN: 978-3642054921.
- [9] Gramacy, R.: *Parameter space exploration with Gaussian process trees*. Advancement Proposal, University of California Santa Cruz, 2004.
- [10] Spur, G.; Krause, F.-L.: *Das virtuelle Produkt Management der CAD-Technik*. Carl-Hanser Verlag: München, 1997.
- [11] Witten, I. H.; Eibe, F.: *Data Mining – Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Morgan Kaufmann, San Francisco, 2005.

# Ganzheitliche Integration von „Design for X“-Kriterien in den mechatronischen Produktentwicklungsprozess am Beispiel der Gewichtsoptimierung

Tobias Luedeke, Michael Vielhaber

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität des Saarlandes

Campus E 2.9, 66123 Saarbrücken

E-Mail: luedeke@lkt.uni-saarland.de; Internet: <http://www.lkt.uni-saarland.de>

**Inhalt:** Die ganzheitliche Integration von „Design for X“-Kriterien in den Produktentwicklungsprozess gestaltet sich oft schwierig, einerseits aufgrund fehlender Methoden für einzelne Prozessschritte, andererseits aufgrund der gleichzeitigen Existenz mehrerer DfX-Kriterien und der damit verbundenen schwierigen Entscheidungsfindung während der Entwicklung. Die Betrachtung des Entwicklungsprozesses mechatronischer Produkte birgt in diesem Zusammenhang zusätzliche Problemstellungen, da durch Multidisziplinarität und Interdisziplinarität die Komplexität des Entwicklungsprozesses erhöht wird. Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz beschäftigt sich mit der integrierten Entwicklung gewichtsoptimierter, mechatronischer Produkte als Beispiel für X-orientiertes Entwickeln („Design to Weight“).

**Abstract:** The holistic integration of „Design for X“ criteria into the product development process is rather difficult and challenging, on one side due to missing methods for specific process steps, on the other side due to the simultaneous presence of several DfX criteria and thus the associated decision making during the design process. The consideration of the development process of mechatronic products raises additional problems in this context because of the increased complexity of the design process caused by multidisciplinary and interdisciplinarity. The approach presented here deals with the integrated development of weight-optimized, mechatronic products as an example of X-oriented design („Design to Weight“).

**Stichwörter:** Design for X, Design to X, ganzheitliche Integration, mechatronischer Entwicklungsprozess, Gewichtsoptimierung

**Keywords:** Design for X, Design to X, holistic integration, mechatronic design process, weight optimization

## 1 Einleitung

Mechatronische Entwicklungsprozesse zeichnen sich durch hohe Heterogenität, Multidisziplinarität und damit hoher Komplexität aus. So wird bei der Entwicklung mit wechselndem Detaillierungs- und Konkretisierungsgrad vorgegangen, um Wechselwirkungen innerhalb des mechatronischen Systems so früh wie möglich erkennen zu können. Dadurch können weitere Probleme auftreten, wenn während der Entwicklung Design for X-

Kriterien betrachtet werden müssen. Die fehlende Integration von Design for X-Kriterien in Entwicklungsprozesse und in die Konstruktionsmethodik gründet auf dem Fehlen von bestimmten Methoden für einzelne Prozessschritte und der schwierigen Entscheidungsfindung aufgrund des Auftretens mehrerer, simultan auftretender Einschränkungen durch X-Kriterien. Dadurch ist die Akzeptanz in Industrie für Entwickler und Konstrukteure beschränkt. Durch das Betrachten des mechatronischen Entwicklungsprozesses können allerdings zusätzliche Innovations- und Erfolgspotenziale freigesetzt werden.

## **2 Design for X**

### **2.1 Begriffsdefinition**

Die Literatur bietet neben dem „Design for X“ auch noch den Begriff „Design to X“ an, die beide oft unter dem Begriff „Design for X“ zusammengefasst werden, allerdings unterschiedliche Bedeutungen aufweisen. Eine Übersicht über die verschiedenen Definitionen wird im Folgenden gegeben, wobei nur ein Auszug aus den in der Literatur gefundenen Stellen gegeben wird.

#### **Design for X**

Allgemeine Definition geben Hubka und Huang in ihren Abhandlungen. Sie unterscheiden die Begrifflichkeiten DfX und DtX nicht. Hubka definiert Design for X als „ein Wissenssystem, in dem die Erkenntnisse, wie einzelne Eigenschaften technischer Systeme beim Konstruieren zu erreichen sind, in geeigneter Form gesammelt und geordnet werden“ [5], wohingegen Huang Design for X als eine Entscheidungsfindung während des Entwicklungsprozesses – bezogen auf Produkte, Prozesses und Maschinen – ansieht [4]. Ehrlenspiel beschreibt Design for X als etwas, das „mehr allgemein benutzt [wird], z.B. „Design for Disposal“ [3]. Vielhaber sieht in Design for X eher spezielle Richtlinien, die oft nur reaktiv angewandt werden und meistens auf die Ausarbeitungsphase beschränkt sind. Die Richtlinien werden für Folgeprozesse im Designprozess, z.B. Zusammenbau oder Recycling, benutzt [11].

#### **Design to X**

Komplementär zu „Design for X“ interpretieren Ehrlenspiel und Vielhaber „Design to X“ auf folgende Weise, nämlich dass, „Design to X [...] zielgerichteter, mehr quantitativ: z.B. „Design to a Cost Target [ist]“ [3] bzw. dass Design to X für allgemeine Ziele und bestimm-



te Aspekte des Entwicklungsprozesses (z.B. Kosten oder Qualität) und proaktiv über einen größeren Bereich des Prozesses eingesetzt werden [11].

## **Zusammenfassung**

Die Definitionen zeigen, dass es verschiedene Zielrichtungen gibt, die auch in dieser Arbeit zum Tragen kommen. Die Begriffe werden nach der Definition von Vielhaber [11] aufgefasst:

- „Design for X“ beschreibt die reaktive, methodische Unterstützung bei Entwicklung eines Produktes auf eine Eigenschaft – bestimmt durch ein Set von Merkmalen – hin, die nötig ist, um einen Folgeprozess im Produktlebenszyklus erfolgreich zu gestalten (z.B. Fertigungsgerechtigkeit).
- „Design to X“ beschreibt die proaktive, methodische Unterstützung bei Entwicklung eines Produktes auf eine Zieleigenschaft hin (z.B. Kostengerechtigkeit).
- Das „X-orientierte Entwickeln“ („X-oriented Design“) bezeichnet die Sammlung aller „Design for X“- und „Design to X“-Kriterien.

Bei den Definitionen werden die Begriffe „Merkmale“ und „Eigenschaften“ nach der Auffassung des CPM/PDD-Ansatzes nach Weber [13] verstanden.

## **2.2 Design for X in der Produktentwicklung**

Die Hauptzielsetzungen (unabhängig davon ob Design to X oder Design for X) werden oftmals mehrmals über den Entwicklungsprozess betrachtet und somit müssen jeweils Entscheidungen herbeigeführt werden. So zum Beispiel werden in frühen Entwicklungsphasen die Kriterien berücksichtigt, müssen aber später beim Ausarbeiten der Produktgestalt eventuell neu fokussiert und angepasst werden [9]. Somit lässt sich grundsätzlich feststellen, dass die Anwendung von Methoden und Werkzeugen des Design for X eine Möglichkeit darstellt, um die zahlreichen Einschränkungen im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen [12]. Dabei müssen sowohl Analyse- als auch Synthese-Schritte miteinbezogen werden. Weber begründet eine schlechte Integration von Design for X-Methoden und Tools in die Konstruktionsmethodik damit, dass sich die durch Design for X geforderten Eigenschaften (z.B. Festigkeits- oder Montagegerechtigkeit) nicht mehr so einfach durch Begriffe wie „Funktionsstruktur“ oder „Lösungsprinzip“ beschreiben lassen [14].

### **2.3 Entscheidungsfindung bei multiplen DfX-Kriterien**

Viele Methoden aus der X-orientierten Entwicklung spiegeln oft nur die Unterstützung zur Erreichung einer bestimmten Produkteigenschaft dar. Allerdings muss das Produkt selbst viele anderen, oft widersprüchlichen Anforderungen gerecht werden, was dazu führt, dass die Entscheidungsfindung bei multiplen DfX-Kriterien oft sehr komplex wird. Eine zu starke Fokussierung auf ein Teilziel (z.B. Fertigungsgerechtigkeit) hat zur Folge, dass andere Aspekte (z.B. Service- oder Montagegerechtigkeit) nur unzureichend betrachtet werden, was ein unausgewogenes Endprodukt nach sich zieht. Ansätze, die mehrere simultan vorherrschende Design for X-Kriterien betrachten, werden in der Fachliteratur vorgestellt (z.B. [1, 2, 12] u.v.m.). Dabei spielen Optimierungsalgorithmen wie z.B. die Pareto-Optimierung eine entscheidende Rolle.

## **3 Der mechatronische Entwicklungsprozess**

Der mechatronische Produktentwicklungsprozess nach VDI 2206 [10] ist geprägt durch drei Bestandteile: die allgemeine Problemlösung als Mikrozyklus, das V-Modell als Makrozyklus und vordefinierte Prozessbausteine (Systementwurf, Domänenentwurf, Systemintegration, Modellbildung/-analyse sowie Eigenschaftsabsicherung). Allerdings werden besondere Herausforderungen an den Entwicklungsprozess gestellt. Einerseits sind mechatronische Systeme aufgrund der hohen Anzahl verkoppelter Elemente durch hohe Komplexität gekennzeichnet, andererseits sind mechatronische Systeme durch die Lösungssuche in verschiedenen Domänen geprägt (Heterogenität) [8].

## **4 Herausforderungen bei der Integration von DfX-Kriterien in den mechatronischen Entwicklungsprozess**

Aus den vorherigen Kapiteln ist ersichtlich, dass eine Integration in den mechatronischen Produktentwicklungsprozess einige Herausforderungen an die Entwicklungsmethodik stellt. Folgende Anforderungen an eine holistische Integration sind zu berücksichtigen:

- Die Integration soll keine erhöhten Entwicklungszeiten sowie höhere Kosten verursachen.
- Eine ständige Kontrolle und Überwachung des Zielmerkmals bzw. der Zieleigenschaft über den ganzen Produktentwicklungsprozess ist durch die Einfüh-

rung von speziellen Analyseschritten zu bewältigen. Darüberhinaus sollen durch die Analysen weitere Synergien und Potenziale freigegeben werden.

- Die Kontroll- und Bestimmungsmethoden müssen entsprechend des Zeitpunktes während der Entwicklung und des Reifestatus des Merkmals bzw. der Eigenschaft angepasst werden. Dabei ist es logisch, dass sich der Status der Eigenschaft und damit die Art der Bestimmung des Ziels sich mit der Produktreife und dem Produktlebenszyklus ändern. In den frühen Phasen sind nur grobe Werte des Ziels vorhanden, wohingegen in den späten Phasen sehr detaillierte Werte angegeben werden können. Damit ändert sich auch die Art der Bestimmung des Ziels von einer Schätzung aus der Erfahrung über Berechnungen bis hin zu physikalischen Bestimmungen in der späten Phase der Produktentwicklung.
- Gerade im Hinblick auf die Komplexität und Heterogenität von mechatronischen Systemen sind die Illustration von Systemabhängigkeiten und damit die Bestimmung von Merkmals- bzw. Eigenschaftsänderungen wichtig. Durch Analogien zu Methoden und dem Grundgedanken des Systems Engineering sollen Verhaltensmöglichkeiten des Systems (hier: Merkmals- bzw. Eigenschaftsänderungen des Systems) und Einwirkungen aus der Umgebung (hier: X-Kriterien) untersucht und berücksichtigt werden.

## **5 Das Beispiel Gewichtsoptimierung („Design to Weight“)**

Als Beispiel für eine ganzheitliche Integration von X-Kriterien in den mechatronischen Entwicklungsprozess dient die Gewichtsoptimierung. Dadurch dass das „Gewicht“ eines Produktes eine Zieleigenschaft darstellt, handelt es sich dabei um „Design to Weight“, also eine Zielgerichtetheit auf das Gewicht und die damit verbundenen Gewichtsaspekte, wie z.B. Gewichtsverteilung oder Schwerpunktlage, während der Entwicklung des mechatronischen Produktes.

### **5.1 Die gewichtsoptimierte mechatronische Entwicklung**

Ein Rahmenwerk für eine integrierte Methodik zur gewichtsoptimierten mechatronischen Entwicklung wurde in Vorarbeiten der Autoren vorgestellt und beschrieben [6]. Es bleibt festzuhalten, dass die vielen existierenden „klassischen“ Leichtbaustrategien und -

methoden nicht mehr ausreichen, um alle Potenziale und Synergien für die Gewichtsoptimierung auszunutzen. Das gründet einerseits auf der Tatsache, dass Gewichtsaspekte während der Entwicklung unsystematisch und das zu entwickelnde System bzw. Produkt nicht ausreichend berücksichtigt werden und andererseits dass die Methoden nur sporadisch und spät im Entwicklungsprozess eingesetzt werden. Mit der entwickelten Methodik soll einerseits ein Front-Loading der Gewichtsoptimierung von der physikalischen Produktstruktur zu den abstrakteren Strukturen in den frühen Phasen der Entwicklung betrieben werden, andererseits sollen mechatronische Systeme selbst als Möglichkeit angesehen werden, innerhalb eines übergeordneten Systems als „Gewichtsoptimierer“ zu fungieren.

## **5.2 Prozessmodell**

Das Prozessmodell auf Makro-Ebene (Abbildung 1) baut auf Elementen aus der Mechatronik-Entwicklung und des Systems Engineering auf. Gekennzeichnet ist das Modell durch fünf Hauptphasen, wobei jeweils die Konzeptentwicklung (Synthese) und Modellierung bzw. Simulation (Analyse) sowie Entwerfen bzw. Ausarbeiten (Synthese) und Prototyping bzw. Testing (Analyse) parallel ablaufen und regelmäßiger Austausch stattfindet. Der Startpunkt bildet die Produktplanung. Die Hauptphasen sind jeweils durch Hauptanalysepunkte getrennt. Diese stellen den Abschluss dieser Hauptphasen und damit wichtige Entscheidungspunkte dar. Außerdem sind sie Ausgangspunkt für Makro-Iterationen, die aber möglichst aufgrund des großen Zeit- und Kostenaufwandes zu vermeiden oder wenigstens weniger oft zu durchlaufen sind. Die einzelnen Synthesephasen zeichnen sich dadurch aus, dass jeweils ein Mikro-V-Modell die Entwicklungsschritte beschreibt, die wiederum durch Analysepunkte voneinander getrennt sind. Diese stellen somit Ausgangspunkte für Mikro-Iteration innerhalb einer Hauptphase dar. Die V-Modelle drücken das „systemhafte“ Vorgehen von Gesamtsystem, Teilsystemen und Komponenten aus, wobei darauf geachtet werden muss, dass im Gegensatz zum V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 [10] nicht unbedingt auf Domänenebene partitioniert werden muss, da die Optimierung des Gesamtsystems im Vordergrund steht und nicht einzelner Komponenten oder Domänen. Daher ist es sinnvoll, auch domänenübergreifende Lösungskonzepte gerade in Bezug auf Gewichtsoptimierung auf Komponenten- bzw. Teilsystemebene zu betrachten. Weitere Details können in [6] nachgelesen werden. Durch den ständigen Abgleich der Gewichts-

merkmale und Eigenschaften und der damit einhergehenden Möglichkeit von Mikro-Iterationen sollen bzw. können Makro-Iterationen möglichst vermieden werden.

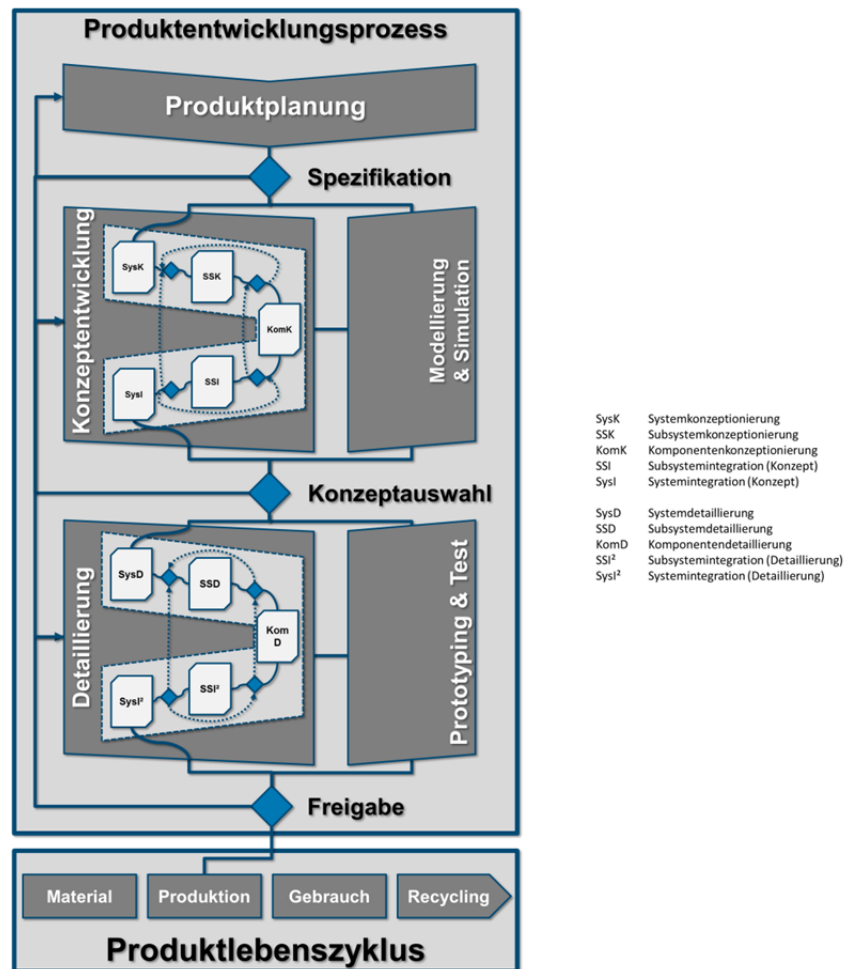


Abbildung 1: Prozessmodell der Methodik

### 5.3 Analysepunkte

Die oben beschriebenen Makro- und Mikro-Analyseschritte gewährleisten durch ihre Existenz über den gesamten Produktentwicklungsprozess eine ständige Kontrolle und Überwachung der Zielmerkmale bzw. Zieleigenschaften des Produktes.

Die Analysepunkte unterscheiden sich voneinander durch folgende Faktoren:

- Anwendungszeitpunkt: Analysen erfolgen entweder nach einer Hauptphase oder nach einem Entwicklungsschritt innerhalb einer Hauptphase.
- Art der Analyse: Aufgrund des Reifegrades des Produktes und damit der Gewichtseigenschaften und Merkmale müssen verschiedene Arten von Analyse

durchgeführt werden, z.B. Abschätzungen, Vorhersagen, Berechnung, Wiegen. Für die jeweilige Analyseart stehen ausreichend bekannte Methoden zur Verfügung.

- Untersuchungsgegenstand: Der zu analysierende Datensatz ergibt sich aus dem bearbeiteten Prozessschritt, z.B. Anforderungen, Funktionsstruktur, Baustruktur, Prototypen etc.
- Systemebene: Die Analyse kann auf verschiedenen Systemstufen erfolgen, z.B. Gesamtsystem, Subsysteme, Komponenten.
- Ergebnis: Entscheidend für den Verlauf und Erfolg des weiteren Entwicklungsprozesses sind die Qualität und vor allem die Interpretation der Ergebnisse. Neben den analysierten Gewichtseigenschaften spielen auch Gewichtsabhängigkeiten innerhalb des Systems eine wichtige Rolle.

#### **5.4 Systemverständnis und Systemdenken als Grundlage der Gewichtsoptimierung**

Als Grundlage für die Gewichtsoptimierung wurde ein Systemmodell entwickelt, dass es möglich macht, sowohl Gewichtsänderungen von Komponenten mit Auswirkungen auf das Gesamtsystem (bottom-up) als auch umgekehrt (top-down) zu bestimmen. Das gründet daher, dass die klassischen Leichtbaustrategien lokal beschränkt angewendet werden, z.B. an einer Komponente, ohne dabei die umliegenden Strukturen dementsprechend anzupassen, was zu einer Überdimensionierung führen kann. Aus Systemsicht ist damit nicht das ganze „Leichtbaupotenzial“ ausgeschöpft. Hier knüpft die Idee der sekundären Gewichtseinsparung an, die gerade diese überdimensionierten Bereiche anspricht. Um diese erkennen zu können und damit neue Potenziale freigeben zu können, ist es notwendig, die Gewichtsabhängigkeiten innerhalb des Gesamtsystems abzubilden und zu illustrieren.

Das Systemmodell basiert auf einer mathematischen Beschreibung der Gewichtsbeziehungen innerhalb des Gesamtsystems (Abbildung 2): vertikal die Anteile und Abhängigkeiten zwischen zwei Systemebenen und horizontal die Beeinflussungen innerhalb einer Systemebene [7]. Darüberhinaus bietet das mathematische Modell die Möglichkeit einer Gewichtssensibilitätsanalyse an, d.h. es wird illustriert, welches Teilsystem oder Komponente am besten geeignet ist, um eine bestimmte Gewichtsoptimierung des Gesamtsystems herbeizuführen. Außerdem stellt das Systemmodell eine Grundlage für die Betrachtung multipler X-Kriterien und deren Entscheidungsfindung dar. Durch Erweiterung

auf eine vektorielle bzw. tensorielle Beschreibung können Kriterien wie z.B. Kosten, Funktionalität etc. simultan betrachtet werden.

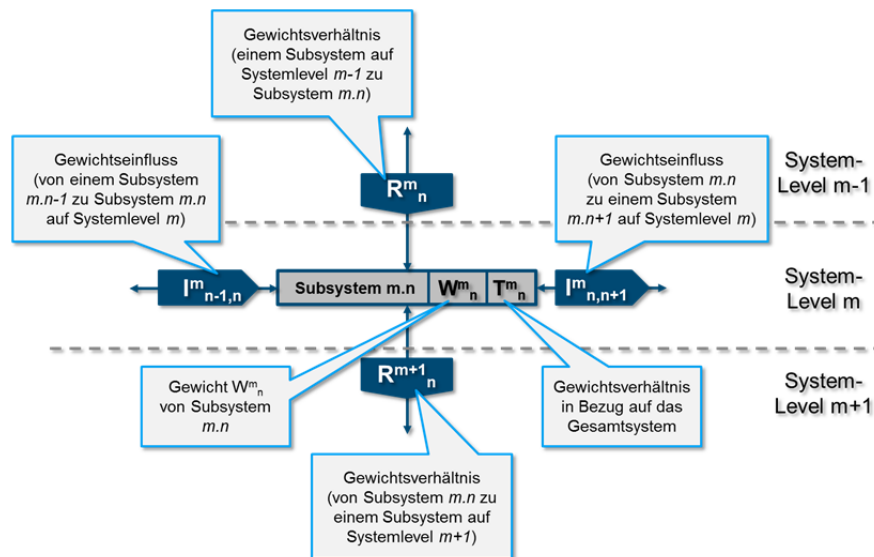


Abbildung 2: Mathematische Beschreibung der Gewichtsabhängigkeiten

## 6 Diskussion und Fazit

Der Beitrag bietet am Beispiel der Gewichtsoptimierung einen Vorschlag für eine ganzheitliche Integration von X-Kriterien in einen mechatronischen Produktentwicklungsprozess an. Aufbauend auf einem Überblick über die verschiedenen Begrifflichkeiten „Design for X“, „Design to X“ und einer eindeutigen Definition dieser wurden Herausforderungen an die Integration gestellt, die dann am Beispiel der Gewichtsoptimierung dargelegt wurden. So ist es für die holistische Einbindung von X-Kriterien notwendig, eine durchgängige, über den ganzen Entwicklungsprozess laufende Überprüfung der Kriterien notwendig. Durch die dadurch entstehenden Mikro-Iterationen ist es möglich, neue Potenziale und Synergien zu erkennen und zu berücksichtigen. Außerdem kann die Zahl der Makro-Iterationen verringert werden. Ein wichtiger Punkt, gerade bei komplexen, mechatronischen Systemen stellt darüberhinaus die Illustration von Systemabhängigkeiten in Bezug auf Gewichtskriterien dar. Dieses Systemmodell kann außerdem bei Erweiterung weitere X-Kriterien betrachten und stellt somit die Grundlage für eine multikriterielle Entscheidungsfindung dar.

## Literatur

- [1] Andreasen, M. M.; Mortensen, N. H.: *Basic Thinking Patterns and Working Methods for Multiple Design for X*. In Meerkamm, H. (Hg.): *Beiträge zum 8. Symposium DfX*. Erlangen. Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, 1997
- [2] Bauer, S.: *Entwicklung eines Werkzeuges zur Unterstützung multikriterieller Entscheidungen im Kontext des Design for X*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Band 404. VDI-Verlag. Düsseldorf, 2009
- [3] Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München, Wien. Hanser, 2009
- [4] Huang, G.Q.: *Design for X - Concurrent engineering imperatives*. London. Chapman & Hall, 1996
- [5] Hubka, V.: *Design For – DF*. In Meerkamm, H. (Hg.): *Beiträge zum 6. Symposium Fertigungsgerechtes Konstruieren*. Erlangen. Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, 1996
- [6] Luedeke, T.; Vielhaber, M.: *Consideration of Weight Properties during the Design of Weight-Optimized Mechatronic Products*. In Lindemann, U. et al. (Hg.): *Proceedings of ICED'13 – Volume 5*. Glasgow. The Design Society, 2013
- [7] Luedeke, T.; Meiser, P.; Vielhaber, M.: *Systematic Determination of Secondary Weight Improvements*. In Marjanovic, D. et al. (Hg.): *Proceedings of the 13th International Design Conference DESIGN 2014*. Glasgow. The Design Society, 2014
- [8] Möhringer, S.: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 156. Paderborn. Heinz-Nixdorf-Institut, 2004
- [9] Ponn, J.; Lindemann, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte – Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen*. Berlin, Heidelberg. Springer, 2011
- [10] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 2206 – Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Berlin. Beuth-Verlag, 2004
- [11] Vielhaber, M.: *Design to Knowledge – A Root Design Principle*. In Scharff, P.; Kurtz, P. (Hg.): *Proceedings of the 56th International Scientific Colloquium (IWK)*. Ilmenau. TU Ilmenau, 2011
- [12] Wartzack, S.: *Predictive Engineering – Assistenzsystem zur multikriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Band 336. Düsseldorf. VDI-Verlag, 2001
- [13] Weber, C.: *CPM/PDD – An Extended Theoretical Approach to Modelling Products and Product Development Processes*. In Bley, H. et al. (Hg.): *Proceedings of the 2nd German-Israeli Symposium on Advances in Methods and Systems for Development of Products and Processes*. Stuttgart. Fraunhofer-IRB-Verlag, 2005
- [14] Weber, C.: *Produkte und Produktentwicklungsprozesse mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften – eine kritische Zwischenbilanz*. In Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hg.): *Beiträge zum 23. Symposium DfX*. Hamburg. TuTech, 2012



## Approach on Remote Maintenance Supervision of Solar Home Systems

Kevin Wrasse \*, Lars Wolter \*\*, Haygazun Hayka \*, Rainer Stark \*<sup>\*\*\*</sup>

\*Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK), Berlin

E-Mail: kevin.robert.wrasse, haygazun.hayka, rainer.stark@ipk.fraunhofer.de;

Internet: www.ipk.fraunhofer.de

\*\* Industrielle Informationstechnik, Technische Universität Berlin

E-Mail: lars.wolter, rainer.stark@tu-berlin.de; Internet: <http://www.iit.tu-berlin.de>

**Abstract:** *Decentralized electrification in emerging countries is facing several problems in the area of ensuring service quality at planning, installing and maintenance of solar home systems. Within product-service system development it is more likely to achieve efficient services and long term customer relationships. To ensure this quality, one has to rely on a network of trained and experienced service providers. This is often not given, especially in rural areas of emerging countries. To control service quality, these activities have to be managed centrally. Remote monitoring of condition parameters is applied, thus the parameters can be analyzed and faulty components as well as improper use can be detected. So far, a centralized control of the maintenance activities is not technically implemented in this case. In this stage, one still has to rely on the technicians skills. To control the quality of this activity, augmented reality can be used to guide the technicians through defined repair plans and checklists. Using marker-less tracking and to adapt on the complexity of many product variants, a model-based tracking algorithm is implemented in this application.*

**Keywords:** *augmented reality, maintenance assistance, remote monitoring, solar home system*

### 1 Introduction

In many emerging countries solar home systems (SHS) have been established as a successful option for electrification of households without access to electrical infrastructure. Microfinance institutions enable people with low incomes to divide the high acquisition costs. Bad transport infrastructure and a lack of trained technical staff make it difficult to expand the distribution. Bad planning, faulty installations and unclear warranty cases are reducing confidence into this technology [1]. The project MEVIS (that means Micro Energy Supply System) is conducted at the Fraunhofer IPK to improve quality of planning, installation and maintenance of SHS. New approaches from the common department of Fraunhofer IPK and Technische Universität Berlin on developing product-service systems

(PSS) have been applied to focus on customer demands as well as the product life cycle and ensure high quality of service activities. To meet the specific conditions of the target regions, a remote monitoring system was implemented to centralize control of product life cycle processes. Faulty components or improper use are detected early and are already known by the technician in preparation of maintenance. This makes service processes much more efficient and reduces demands on experience of the technician. Although this technology still depends on existing infrastructure, it can help to offer a quality service, even under difficult conditions [2]. In the end, it still requires a high training effort to carry out the repair. Written repair manuals are difficult at high illiteracy rates and regional languages in emerging countries [1].

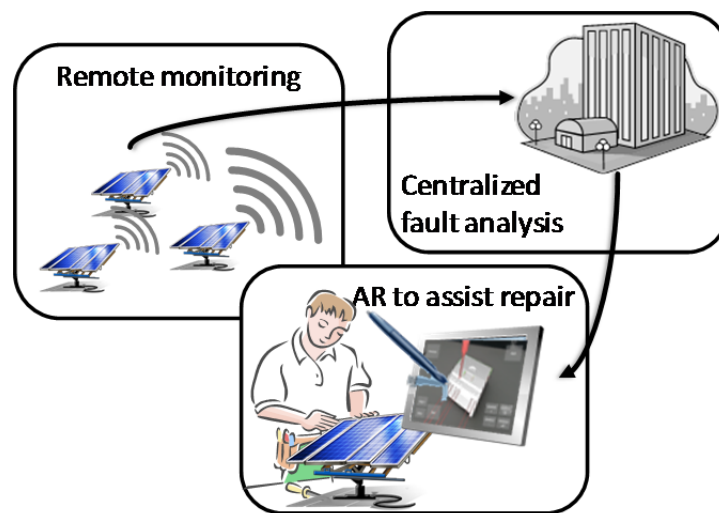


Figure 1: Overview of the approach

To extend the support of service quality through a remote monitoring system, the software on the mobile device of the technician is complemented by an augmented reality maintenance assistant. The technician will be directed through the repair processes by an interactive checklist. To avoid barriers of illiteracy or languages, information is given by symbols or 3D-graphics. Repair assistance and 3D-graphics are specific to each product and the detected faults. The data is stored in a central database and sent to the service tablet when the service technician performs regular maintenance or repairs a detected fault. An overview of this approach is shown on figure 1.

## 2 Concept of remote maintenance control

Local distributors of SHS and micro finance institutions are facing the problems that planning of SHS is often not suited to customer demands. A lack of trained technicians for installation and improper use cause unclear warranty cases, and the disposal at components' end of life is not considered [1]. Product-service system development integrates all conditions that influence the system at the whole product life cycle. "... the provider accepts major responsibilities for product-oriented services. Therefore, those services gain quality by which provider as well as end user profit. The confidence of both business partners in the technology increases and is the basis for a long-term relationship." [3]. One basis are the customer needs, which is a reference for evaluating the PSS. Networks of suppliers have to be analyzed and strategies are developed, how suppliers can be enabled to fulfill required quality standards. If these methods have been applied consistently, a good basis for long-term customer relationships and high customer satisfaction will be created [4].

### 2.1 Improvements by remote monitoring

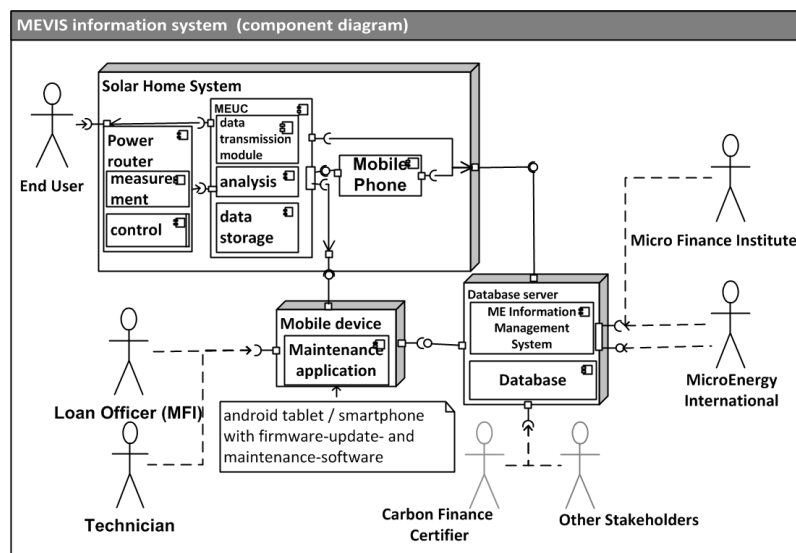


Figure 2: Architecture of MEVIS (left), relations of remote maintenance control data (right)

Many objectives of the PSS methods require high investments in infrastructure and training of workers, which mean a high risk for local SHS sellers and micro finance institutions (MFI). In this project the problems are addressed by remotely monitoring the sup-

ported systems to control service activities centrally, as shown in figure 2 (left). This enables access on data that shows important information: Overloading, Bridging of controller, System performance, Battery measurement, Carbon emission savings and Usage profiles.

## **2.2 Centralized fault analysis**

The remote monitoring is conducted by an information system which consists of a measuring and a transmitting unit inside the controller of the SHS, and a database on a web server. Relevant parameters were measured and stored, which are voltage and current of PV-module, battery and the connected loads. The file format that was chosen for data storage and transmission is JSON, and is periodically uploaded on the web server and stored in the database. The data is analyzed on the server by using reference curves, specific for each system configuration and by including meteorological data. If there are any significant deviations in monthly averages or immediate outages of system components, an alert message is sent to responsible technicians. Before visiting a customer, he already knows about the fault and brings the needed spare parts and tools along. This helps to make the maintenance process more efficient and to raise quality and reliability of the systems.

During the use stage, dynamic data of relevant system parameters has to be stored and related to a specific system and its components to assign results of analysis processes. Its high amount and the frequent access need to adapt the database to these issues. This database has to offer consistency as well as dealing with big amounts of data and highly frequented access operations. A noSQL-database with a middle-tier consistency is chosen to fulfill these issues. It starts with the identity of the solar home system. This assigns the data from remote monitoring to a specific system. Each system consists of at least three components: PV-panel, battery and charge controller. For each component, a group of major faults has been defined. Again, the faults are related to specific repair processes which are linking to the interactive 3D-repair-instruction models.

## 2.3 Processing of monitoring data

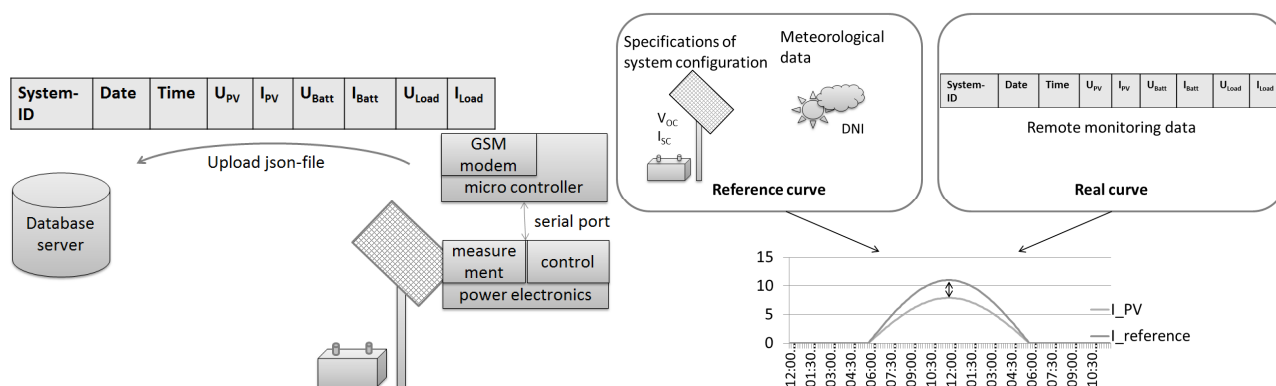


Figure 3: Remote monitoring process (left), analysis process (right)

In use stage, system parameters are measured permanently and sent in JSON-file to the server once a day via GSM-network, as shown in figure 3 (left). After this, the analysis starts with an immediate functionality test of the components. Secondly, a long-term analysis is performed to check out the system condition more precisely. This process is shown on figure 3 (right). The difference between a calculated reference curve and the real data gives indications for the condition of system components. A long-term analysis of average daily energy production of a PV-panel shows significant differences in case of a fault. The voltage that indicates the battery charge level can be used to calculate discharge time and capacity. Plugging in more load than the system design limitation leads to a faster wear of the components. Beyond a defined threshold, the responsible technician is notified. Before he visits the customer, all relevant information is uploaded on a tablet-PC. Detected faults in the database are linking to files with fault descriptions and the 3Dmodels of the interactive repair instructions.

## 3 Augmented reality for repair assistance

Augmented reality (AR) has become a common used tool in the manufacturing and service industry, delivering contextual information about work pieces and associated tasks while the hands of the worker are kept free to work [5]. An AR system captures the view of a person using a camera and recognizes objects in the recorded image. The AR System computes position data for overlay objects or textual information and displays them to the

user. The idea how an AR assistance system is supported with information in this particular approach is shown in figure 4.

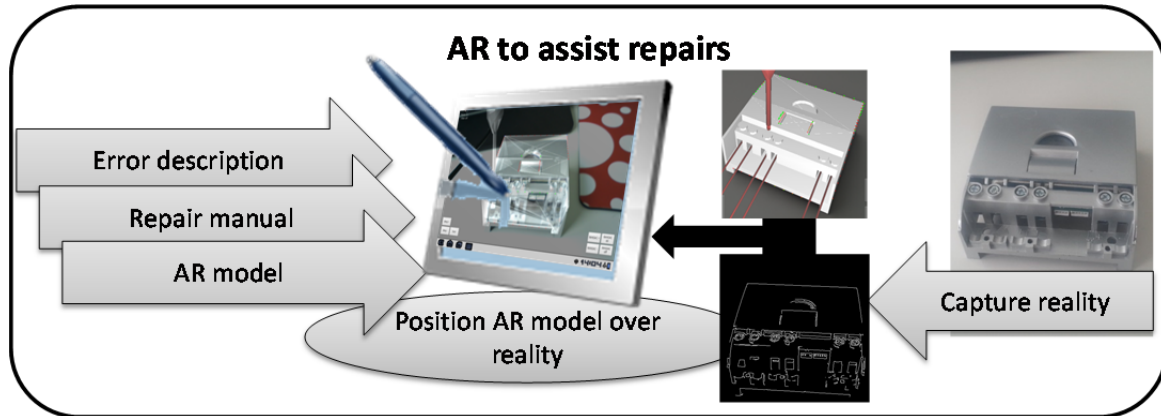


Figure 4: Principle of the AR system used to assist repairs

Developers often rely on marker-based tracking, which is well suited for quick testing, but needs precise placement of markers before tracking. This causes very much effort in relation to the repair and reverses the positive effects of the assistance. Additional problems arise because of constant visibility of the marker in the camera frame as well as the object not being occluded by the marker [6]. These properties led to the decision to choose marker-less tracking for 3D registration. From the 3D-CAD-Models sequences for repair instructions are created and used for maintenance assistance. With the use of augmented reality technologies it is possible to link these virtual models with its real counterpart by connecting the AR System to product data management systems for example [7]. This helps the technician to relate the information immediately to the real object and helps to improve training effects [8]. When the product itself can be tracked with the support of its DMU, you can produce a closer relation between the virtual and the physical product. This can improve the quality of intuitive perception of the information, which is useful if you have several products in your portfolio and the assistance should adapt on the specific product at the customers site.

The boundary conditions have thus shown that a marker-less and model-based algorithm is required to solve the issue of maintenance assistance, the choice fell on an edge-based tracking algorithm, which is well documented and has a low computational complexity. The algorithm was first described in the publication [9] and is called RAPiD (Realtime Attitude and Position Determination). Updating the pose of the virtual 3D-model towards the pose of the related real object is performed by a comparison of an edge-filtered image

from the camera frame and the edges of the projection of the 3D-model. The filtering algorithm is called Canny-edge-detection [10]. It detects edges of objects in an image that are indicated by a high contrast difference of their adjacent planes. The tracking of the object is performed with a high frame rate on a modern smart phone, but with some weakness in the case of robustness. This can be improved by the application of a filtering algorithm like RANSAC [7].

#### 4 Implementation of mobile maintenance assistant

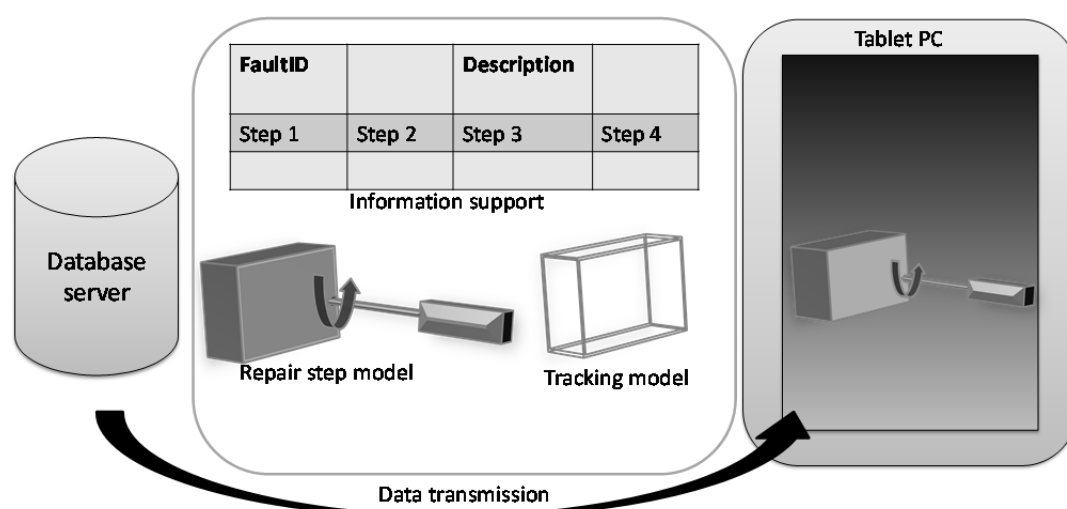


Figure 5: Data support of maintenance assistance

The technician is primarily in touch with the tablet-PC-application, from which data transmission is shown on figure 5. Thus usability of the application has a major influence on the quality of maintenance support. The user interface has to be clear and easy to understand and the number of functions has to be decreased on the minimum that is needed to fulfill the core functions. The status and fault data of the SHS has to be processed into a condition that is suitable to the training level of the technician. Some textual information was replaced by symbols and colors. The symbols are related to functions, system components or fault types and the colors are indicating the severity level of a fault, as shown in figure 6. The AR instruction sequences are derived from 3D-CAD models of the SHS components. The models are converted into .obj- or .stl-format and then edited with a 3D-modeler software (in this case Wings3D). Parts of the product model can be cut off to show disassembly steps. 3D-text is inserted if symbols are not sufficient to explain an issue, such as safety warnings when working on electric parts.

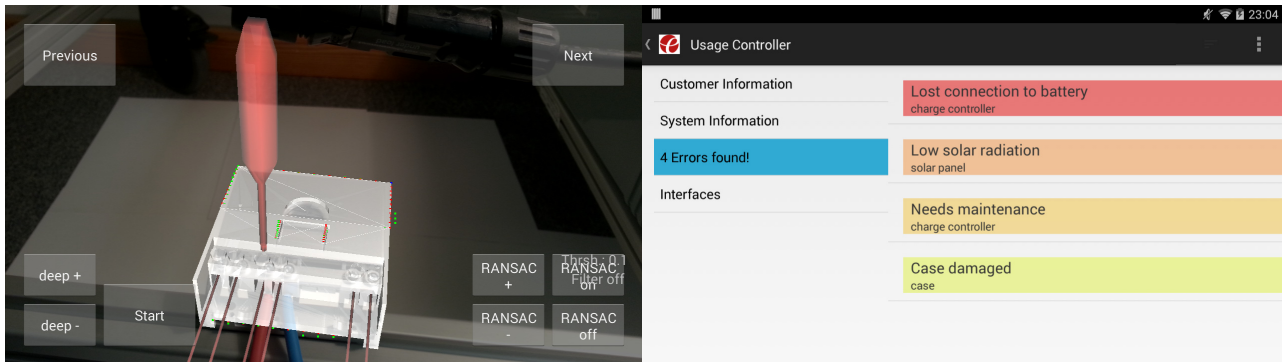


Figure 6: Maintenance application with AR function (left) and error display (right)

The instruction steps are created using assembly and disassembly plans and written repair instructions from the manufacturers. They are translated into particular arrangements of 3D-models of parts, tools and arrows. Each step of the sequence has to provide a clear and simple task for the technician with a balanced level of information details and is stored as an .obj-file. The order of the sequence is written in a .json-file.

To plan all activities of the maintenance process, it was developed using the modeling language BPMN. In this process, all involved actors, as well as the data flows and the activities carried out are shown. When the technician is going to perform the maintenance, he loads the data provided for the repair order from the database on a tablet PC. Now he has all required information, as well as spare parts and tools. On site, the technician can query the information about the installed solar home system of his tablet PC. Before starting maintenance activities, he checks the general status of the solar home system and obtains an overview of all detected faults. This option is shown on Figure 6. When the repair assistance is started, the defective component is shown on the screen. It is now required to point the camera of the tablet to the corresponding real part that it can be tracked. Following the instructions can be executed step by step. The completion of a step is indicated by pressing the "next" button. After all maintenance tasks are completed, they are summarized in a protocol file, which is analyzed in the central database later on. The test scenario for the AR function is shown on figure 7.



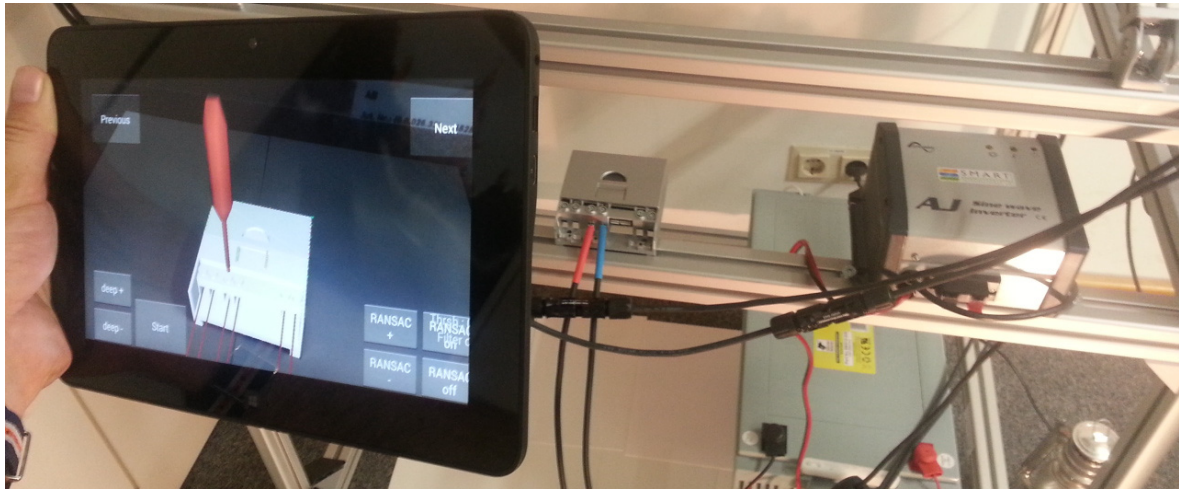


Figure 7: Testscenario of maintenance assistance

## 5 Conclusion

This application provides specific information about the defective system and supports maintenance to be carried out more efficiently. With interactive repair manuals, maintenance steps can be learned quickly and errors are avoided. The tracking method is not very robust with respect to changing contrasts in the background. This can result in a distortion of the overlap between the real and the virtual object and restricts usability of the application. Differences in the brightness do not constitute a major problem, but direct sunlight influences legibility. A tablet PC is a high-tech device that can represent a barrier for technicians in developing countries and may cause concerns to integrate it in their work schedule, and to let that dictate their operations. Considering these aspects it can be a successful addition to the technological support of a product-service system. In particular the tracking needs to be optimized to guarantee a robust function. Alternatives are pre-developed AR environments. The creation of the repair sequences also represents a large amount of work that needs to be repeated for each new component. This would require a development environment which supports the developer to create the AR environments more efficiently.

## 6 Acknowledgements

We like to thank the promoter of the project “MEVIS” Federal Ministry of Education and Research of Germany and the supervisor DLR project promoters. The MEVIS project

is funded under the topic “KMU innovativ” and aims on support of German SMEs with regard to energy efficiency. It is operated jointly with the project partners MicroEnergy International and iPLON, we also like to thank for the collaboration.

## 7 References

- [1] JOHN, J. P., AND MKUMBWA, M. 2011. *Opportunities And Challenges For Solar Home Systems in Tanzania For Rural Electrification*. In *Micro Perspectives For Decentralized Energy Supply*, Technische Universität Berlin, Ed., 124–132.
- [2] WRASSE, K., HAYKA, H., PFOERTNER, A., AND STARK, R. 2014. Increase Sustainability of Decentralized Electricity with Remotely Monitored Product-Service Systems. JCM2014 Proceedings 2014.
- [3] MÜLLER, P., KEBIR, N., STARK, R., AND BLESSING, L. 2009. *PSS Layer Method – Application to Microenergy Systems*. In *Introduction*
- [4] MÜLLER, P., AND STARK, R. 2010. *A Generic PSS Development Process Model Based On Theory And An Empirical Study*. In *International Design Conference - Design 2010*.
- [5] CAUDELL, T. P., AND MIZELL, D. W. 1992. *Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes*. In *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences*, 659–669 vol.2.
- [6] VINCENT LEPETIT, AND PASCAL FUA, 2005. Monocular modelbased 3d tracking of rigid objects: A survey.
- [7] WÖHLER, T., WOLTER, L., ROTHENBURG, U., STRAUCHMANN, M., MADER, S., AND MAXIMILIAN HAUPT. 2010. Konzepte und Implikationen zur Integration von VR-, CAx und PDM-Systemen für die funktionale Absicherung von Montage-/Demontageoperationen. In *Tagungsband 13. IFFWissenschaftstage, Fraunhofer IFF, Ed. Fraunhofer IFF, Magdeburg*, 236–243.
- [8] HENDERSON, S., AND FEINER, S. 2011. *Exploring the benefits of augmented reality documentation for maintenance and repair*. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 17, 10, 1355–1368.
- [9] CHRIS HARRIS, AND CARL STENNETT, 1990. *Rapid - a video rate object tracker*.
- [10] CANNY, J. 1986. *A Computational Approach to Edge Detection*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-8*, 6, 679–698.

## Autorenverzeichnis

|                        |                    |                      |                 |
|------------------------|--------------------|----------------------|-----------------|
| A. Albers .....        | 33, 83, 141, 275   | J. Feldhusen .....   | 11, 63, 95, 313 |
| K. Albrecht .....      | 203                | T. Fieder .....      | 313             |
| M. Altgott .....       | 43                 | M. Frisch .....      | 449             |
| R. Anderl.....         | 173, 193, 203, 225 | P. Gendarz.....      | 287             |
| A. Arndt.....          | 193                | B. Gladysz .....     | 83              |
| S. Arndt.....          | 323                | C. Glenk.....        | 333             |
| I. Barz .....          | 397, 427           | D. Goller.....       | 333             |
| F. Baudach .....       | 397, 427           | K.-H. Grote.....     | 121             |
| C. Benz.....           | 351                | B. Günther .....     | 313             |
| R. Bonertz.....        | 407                | T. Guthmann.....     | 397, 427        |
| R. Bot-Schulz.....     | 131                | T. Gwosch.....       | 51              |
| C. Brecher.....        | 437                | S. Haag.....         | 193             |
| T. Breitsprecher ..... | 461                | S. Hautsch .....     | 449             |
| F. Brezger .....       | 141                | H. Hayka .....       | 107, 481        |
| K. Brökel .....        | 161, 213, 341      | M. Hinkelmann .....  | 83              |
| M. Brumm .....         | 437                | D. Hofmann.....      | 183             |
| N. Bursac.....         | 33                 | S. Holtzhausen.....  | 183             |
| A. Christ.....         | 225                | Y. Hooshmand .....   | 151             |
| S. Dallmeier .....     | 313                | M. Humpa .....       | 263             |
| A. Daryusi .....       | 351, 385           | I. Jonuschies.....   | 213             |
| K. Deese.....          | 449                | S. Jung .....        | 385             |
| C. Dingfelder.....     | 461                | F. Klink.....        | 121             |
| M. Dörr.....           | 83                 | E. Kloß.....         | 161             |
| M. Ebermann .....      | 247                | P. Köhler .....      | 151, 263, 303   |
| F. Engelmann .....     | 397, 427           | A. Korff-Krumm ..... | 151             |
| K. Exner .....         | 1, 107             | B. J. Krause .....   | 213             |

|                          |                    |                        |             |
|--------------------------|--------------------|------------------------|-------------|
| K. Kuhlmann .....        | 121                | F. Schulz.....         | 1, 107      |
| J. Kurth .....           | 213                | I. Schulz.....         | 131         |
| J. Langenbach .....      | 361                | P. Sembdner.....       | 183         |
| E. Leidich.....          | 247                | M. Shafique.....       | 95          |
| A. Lohrengel .....       | 361                | R. Stark.....          | 1, 107, 481 |
| R. Lüdcke .....          | 33                 | W. Steger.....         | 323         |
| T. Luedeke.....          | 407, 471           | E. Steindecker.....    | 323         |
| S. Mangold.....          | 51                 | R. Stelzer .....       | 183, 323    |
| T. Manoharan .....       | 303                | W. Sticht .....        | 43          |
| A. Martha .....          | 303                | J. Thiele .....        | 1           |
| S. Matthiesen.....       | 51                 | K.-D. Thoben .....     | 23          |
| N. Müller .....          | 361                | T. Trinkel.....        | 173         |
| N. Nagler .....          | 361                | J. van der Beek.....   | 11, 63      |
| L. G. Ngahane Nana ..... | 313                | F. Viebahn .....       | 237         |
| J.-H. Ohlendorf .....    | 23                 | M. Vielhaber.....      | 407, 471    |
| J. Pollaschek.....       | 437                | M. Walch.....          | 275         |
| H.-P. Prüfer.....        | 417                | B. Walter .....        | 83          |
| I. Raza .....            | 95                 | S. Wartzack .....      | 461         |
| U. Reichert.....         | 141                | T. Weber Martins ..... | 203         |
| N. Reiß .....            | 83                 | C. Wehmann.....        | 371         |
| F. Rieg.....             | 237, 333, 371, 449 | J. Will .....          | 33          |
| M. Rolbiecki .....       | 23                 | L. Wolter .....        | 481         |
| A. Roller.....           | 385                | K. Wrasse .....        | 481         |
| F. Rudolph .....         | 237                | M. Zocholl .....       | 173         |
| K. Schmitz.....          | 11, 63             | S. Zorn.....           | 341         |
| H. Schnegas .....        | 73                 |                        |             |
| C. Schnürmacher.....     | 1                  |                        |             |
| C. Schöne.....           | 183                |                        |             |